農業設施節能技術與系統研發

蔡致榮[1]、吳有恒[2]
1.行政院農業委員會農業試驗所　研究員兼主任秘書
2.行政院農業委員會農業試驗所　助理研究員

摘　要

當世界各國正努力降低碳排放與減緩全球暖化時，降低能源消耗變成必然趨勢。在高緯度國家，溫室控制燃料消耗的主要部分在於加熱，用以控制溫度和濕度，而在台灣溫室降溫反成為主要訴求。本文主要目的在於綜合回顧世界上主要溫室節能技術與系統研發，並討論其代表性應用，除提供溫室節能的基本、技術、政策與節能措施等供參考外，並導引出值得國內深入研究與發展的可能缺口。可以歸結的是目前並無完美的技術可符合溫室與其內部作物所有節能的需求。系統的選擇與操作是基於像氣候類型、種植作物、花費、維修、操作容易性、系統可靠性、系統壽命等各種參數。因此，溫室節能最適合的技術應該是符合種植者大部分需求狀況，並且是在沒有增加能源使用下，增加作物產出而能獲取最大的回收。

一、引　言

從 1980 年代第一次能源危機，石油供應緊縮造成能源價格顯著提升開始，溫室中能源的有效利用已變成研究與發展的主題。2008 年此種能源價格的高漲又再度發生，加上歐洲 CO_2 減量排放新目標的訂定，導致改善能量效率的新技術再度興起，由於能源是溫室產業總生產成本的基本部分，因此減少能源的消耗便成為溫室產業成敗的關鍵。在歐洲，每年空調的能源使用介於 10-30%，取決於不同的區域，由芬蘭的 1900 MJ/m^2、荷蘭的 1500 MJ/m^2 至法國南部的 500-1600 MJ/m^2。主要挑戰在於尋找符合改善能源效率與減少溫室產業 CO_2 排放的雙需求方法。

對溫室而言，能源可能是種植者的最大成本因素，燃料費用的增加讓種植者能源投入的意願降低；然而，為了維持可獲利性，必須維持相同的生產水準，其方法即在於提升能源效率，亦即在相同能源投入下而獲得更多的產出。有很多方法可改進溫室能源效率，有些甚至不必做大的投資。例如，大量能源的節省可透過改進溫室氣候條件之控制而達成，特別是空氣濕度。能源節省可以透過修補溫室之缺陷與洩漏、檢修材料和設備，以及生產過程的有效管理而達成。

在採取基本措施之後，種植者可在節能技術上做投資，例如絕緣材料、煙氣凝結器、熱緩衝桶、保溫網、更好的電腦、更新溫室、替換無效率之鍋爐與安裝熱電聯合系統(CHP)。有時候，新溫室可以建造在接近電廠或工業區附近，利用它們的餘熱在溫室的加熱上。理想上，對節能的投資將以降低能源成本與可能較高生產而賺回。某些國家提供補貼與稅率獎勵以協助具能源效益設備投資的費用。

在溫室降溫方面，除了最極端狀況外，多數情況下降溫系統的使用幾乎均能有令人滿意的效果。許多場合自然通風可被使用並具有良好效果，而且大型且適當設置的通風器通常就是所要求的全部，有時與排氣風扇(強制通風)或部分反射網(遮蔭)聯合以防止過多太陽輻射的進入。在最大環境溫度少於 33℃的地區，通風與遮蔭技術的使用運作良好。在夏季環境溫度超過 40℃的極端區域，蒸發冷卻是溫室降溫最有效率的方法，其能顯著降低溫室內部氣溫使其低於空氣溫度。在溫室內，風扇-水牆與微霧/煙霧的蒸發冷卻以及屋頂蒸發冷卻系統都可使用。除了這些系統外，有兩項組合系統，例如地對空氣熱交換器系統與地下儲水層連結洞流熱交換器系統,可使用於溫室的加熱與降溫(Sethi et al., 2007)。

本文回顧世界上主要溫室節能技術與系統研發，並且討論其代表性應用，除提供溫室節能的基本、技術、政策與節能措施等供參考外，並導引出值得國內深入研究與發展的可能缺口。

二、 溫室節能的基本與荷蘭經驗

(一) 農業節能的兩個觀念(Bakker, 2009)

1. 單位能源生產(能源效率)的增加可經由減少能源的使用與(或)生產的改善來達成。實際上所有增加生產的栽培措施，例如改善灌溉、較佳營養、病蟲害控制與溫室面積的較佳利用，都能有效提升能源效率。
2. 僅關注於能源效率而不考慮絕對能源的使用，可能會導致不可預期的結果。
   (1)在地中海地區，利用加熱以獲得早期生產與定質量產出，除了有較高的能源效率外，也有較高的絕對能源使用。
   (2)改善環境控制(例如提供較多的 CO_2、額外光源)、強化生產計劃，以及在高溫月份使用冷卻系統來延長生長期，都造成能源消耗的增加。
   (3)在高緯度地區使用較強的人工光源(在芬蘭超過 200 W/m^2，而在荷蘭超過 100 W/m^2)也會增加能源的消耗。

(二) 溫室能源消耗與能源效率(Djevic 與 Dimitrijevic, 2004)

能源、經濟與環境為農業生產系統的三個重要因子。近年來由於人口持續增加與生產技術的進步，使得農業能源消耗大幅成長，而溫室生產系統迄今仍是極度消耗農業能源，生產者所面臨的是高操作成本的溫室生產過程(環境控制、施肥、灌溉等)，因此考慮所有投入的能源，並找出能讓生產更具能源效率的最佳組合就變得非常重要。

1. 能源投入分析

能源投入分析包括直接與非直接能源投入的定義、特定植物生產的能源消耗與能源效率，其定義如下：

(1) 直接能源投入：包括石化燃料能源與再生能源的投入，一般佔總能源消耗的三分之一。加熱溫室之直接能源投入對生產者而言最重要，因為其決定生產效率與產物的市場價格。

(2) 非直接能源投入：包括生產設備與其他生產過程中材料(肥料、農藥、人力與運輸)所使用之能源，一般佔總能源消耗的三分之二。

2. 能源消耗與能源效率的定義

特定植物生產之能源消耗：

$$\text{每公斤產物之能源投入(MJ/kg)} = \frac{\text{生產之能源投入(MJ/ha)}}{\text{產出(kg/ha)}}$$

能源效率：

$$\text{能源出入比(ER)} = \frac{\text{產出之卡路里熱值(MJ/ha)}}{\text{生產之能源投入(MJ/ha)}}$$

$$\text{能源生產力(kg/MJ)} = \frac{\text{產出(kg/ha)}}{\text{生產之能源投入(MJ/ha)}}$$

3. 能量分析例

當確定生產系統之能源消耗時，應該提及所涉及分析目的之能量分析方法，傳統方法是確定非太陽能投入而用於產製特定產品之能源需求總數。表 1 呈現冬天萵苣生產之能量投入(僅營運成本)，由於僅計算至產品離開農場，因此運輸投入並沒被計算在內，並且這些能量投入是根據其能量當量加以估計。

表 1. 冬天多跨距塑膠布加熱溫室萵苣生產之能量分析

投入項目	數量	能量	
		GJ/1000 m^2	%
加熱(燃料油)	10-20 t	834	92.9
CO_2 噴注(燃料油)	900 kg	37.5	4.2
殺菌劑	10 kg	0.95	0.1
肥料			
N	43 kg	3.36	0.37
P_2O_5	5 kg	0.087	0.01
K_2O	13.25 kg	0.18	0.02
播種噴灑(seeding sprays)	1.3 kg	0.124	0.01
箱子	2334	16.23	1.81
種子與填塞混合物(blocking compost)	30	4.5	0.5
勞力		0.75	0.08
總計		897.68	100.00

產出：

3.5 kg/m^2 萵苣 = 3500 kg/1000 m^2 萵苣

2334 箱 x 12 顆/箱 = 28008 顆萵苣

相關能源比率：

每公斤萵苣能量投入(Energy input/kg lettuce)

$$\frac{897.68\,\text{GJ}/1000\,\text{m}^2}{3500\,\text{kg}/1000\,\text{m}^2} = 256.48\,\text{MJ/kg}$$

每顆萵苣能量投入(Energy input/head lettuce)

$$\frac{897.68\,\text{GJ}/1000\,\text{m}^2}{28008\,\text{heads}/1000\,\text{m}^2} = 32\,\text{MJ/head}$$

能源出入比(Energy out-in ratio, ER)

$$\frac{1.46\,\text{GJ}/1000\,\text{m}^2}{897.68\,\text{GJ}/1000\,\text{m}^2} = 0.002$$

(萵苣卡路里熱值0.417 MJ/kg)

能源生產力(Energy productivity)

$$\frac{3500\,\text{kg}/1000\,\text{m}^2}{897.68\,\text{GJ}/1000\,\text{m}^2} = 0.004\,\text{kg/MJ}$$

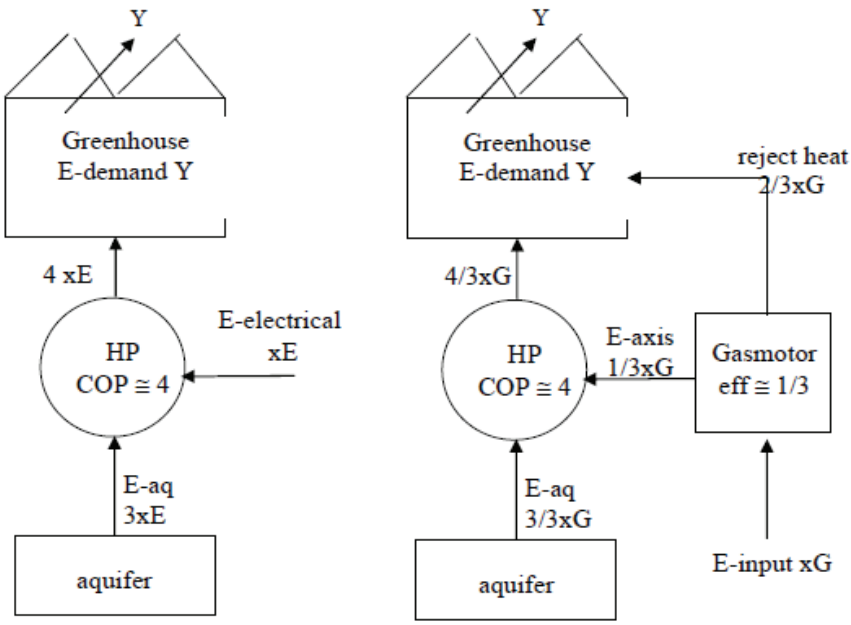
此例中直接能量投入為加熱與 CO_2 增添，而以燃料油型態呈現，其佔總能源消耗的絕大部分，表中可看出必須注意產品的包裝，因為箱子與棧板包含較多的能源數量。此能量分析例所算出之 ER 值與 Enoch (1977)所得類似，相較於動物生產(ER = 0.59)或糧食生產(水稻 ER = 1.3-5，穀物 ER = 1.9)，溫室生產之能源效率(ER = 0.002)很低。此種生產能量分析方法可用於定義特定作物之生產技術與生產區域之氣候參數，或就已經建立之生產領域尋找最大獲利且較少能源消耗之解決方案。最佳化生產程式之計算可以線性程式設計方法開展，其最佳化準則可以是減少能源投入、燃料消耗，或是生產成本。

(三) 荷蘭溫室農業節能經驗(Bot et al., 2005)

最佳化溫室系統通常包括改善之保溫網、改善之氣候控制(溫度、濕度與 CO_2 增添)、輔助光源之改善使用，以及發展低能源消耗之栽培方法。在荷蘭節能之實際限制在於其能源成本只佔總生產成本的 15 至 20%，而農民視能源消耗為降低其生產風險之工具。然而隨著歐盟能源成本新調查系統之使用，能源成本不再與能源消耗成線性比例。

能源成本主要包括尖峰需求(例如最冷時期)之傳輸容量(transport capacity，愈高愈好)所需之成本，以及單位能源投入之商品回收(一般短期內是固定的)。節能主要挑戰在於尋找符合改善能源效率，並結合總能源消耗與減少溫室產業相關 CO_2 排放的方法，因此，節能操作最重要乃在於降低尖峰需求與其所需之傳輸容量，並維持較固定之能源需求，以求達成單位能源之最低總成本。在溫室農業操作上，降低尖峰需求可由使用整合氣象參數之控制邏輯，以及在尖峰需求時期利用保溫網與替代能源(例如生質燃料)而達成，而其他時期之節能策略則僅能節省相對低之商品燃料成本。

對於低能量需求的溫室，可利用絕緣覆蓋、自適性環境控制、整合性控制邏輯與最佳能源管理而實現。在荷蘭約一半的溫室能源需求減少可以經由覆蓋材料之絕緣特性而達成，其挑戰在於同時維持高光穿透性，另一半則由捕捉太陽能並儲存於地下蓄水層以供寒冷時期熱泵使用而實現。各種搭配選項被調查以評估能源投入需求，如圖 1 左所示，使用電源驅動熱泵容許太陽光電系統或風力發電系統之運用，然而當能源需求與供應不能匹配時仍需使用公共電力網當備用系統。就 20 NGE/m^2 之能源需求而言，目前可能最佳之可用系統(具保溫網之雙層覆蓋溫室)每平方公尺大約需要 100 kWh 的驅動能源。以此需求而言，每公頃溫室倘使用太陽光電系統依現在效率需要大約 1.2 ha 之覆蓋面積，或額定功率能量大約 600 kW 之風力發電系統。



電源驅動熱泵	具廢熱回收之燃氣驅動熱泵
需求 Y = 4xE	需求 Y = 2xG
輸入 xE = 1/4 Y = 1/2 xG	輸入 xG = 1/2 Y
從地下蓄水層提供 3/4 Y	從地下蓄水層提供 1/2 Y

圖1. 能量輸入以滿足溫室之能量需求Y(Bot et al., 2005)

三、 溫室節能技術回顧與目前現況

2020年開始，荷蘭限制新建溫室必須在幾乎沒有任何礦物燃料下運作，甚至能夠生產能量(energy producing)，其主要想法是將溫室當成太陽能收集器，可以收集80%進入溫室內的太陽輻射。在西北歐，每年太陽能的照射量為3.5 GJ/m^2，相當於100 m^3天然氣(= 100 NGE)的燃燒值。由於射入溫室的太陽輻射約是溫室本身使用能源的兩倍，溫室因此可以同時作為作物生產系統與產熱系統。一個以“溫室作為能源來源(Greenhouse as Energy Source)”的研發計畫即是利用此想法，其主要方法為：太陽輻射的最大化使用、降低溫室能源的使用與其他永續性資源代替礦物燃料(Bakker, 2009)。

(一) 太陽輻射的最大化使用

增加溫室能源效益的第一步是將進入溫室內的自然輻射最大化使用，使其對生產具有最大的正面效果，並僅需最小的額外加熱。為達上述目的，可藉由改進溫室架構以增加其光穿透性、修改屋頂斜度而使溫室具備最小的反射損失。在南歐，光穿透性的提升可由增加屋頂斜度來達成，在雨量較低的地區，傾斜度約是 0-30 度。在西北歐，可藉由結構組件的最小化來改善光的傳輸，例如最小排水溝尺寸、使用寬玻璃，以及利用白色來塗佈框架以減少結構組件對光的吸收。

溫室覆蓋材料可分成 3 類：玻璃、塑膠膜與硬塑膠片，每種覆蓋材料均具備不同波長的光穿透性。就能量效率而言，可見光與紅外光的穿透是極重要的，冷的時期，覆蓋材料應該具備可見光高穿透性、紅外光的低穿透性，以及高絕緣性。當來自於溫室內的紅外光損失被限制，這些材料讓最大數量的太陽能量進入溫室成為可能，並用於作物生產與增加溫度。由於紅外光具高穿透率，對具能源效益溫室使用而言，除了ETFE(fluoropolymer ethylene tetrafluoroethylene)膜以外，很多塑膠膜材料是次理想的。

為進一步改善材料的光穿透性，幾十年來數種抗反射(antireflex)的塗料被用以防止光的反射，這使得光的穿透率增加 5-6% (圖 2)。塗料也能減少因凝結所致之光量減少，這對塑膠材料尤其重要。在這領域新近創新是利用溫室覆蓋技術 micro V 修改表面架構，但由於覆蓋材料的光穿透性可能因灰塵而顯著降低，因此只有定期清潔這些覆蓋材料才能顯現出其潛在的效應。

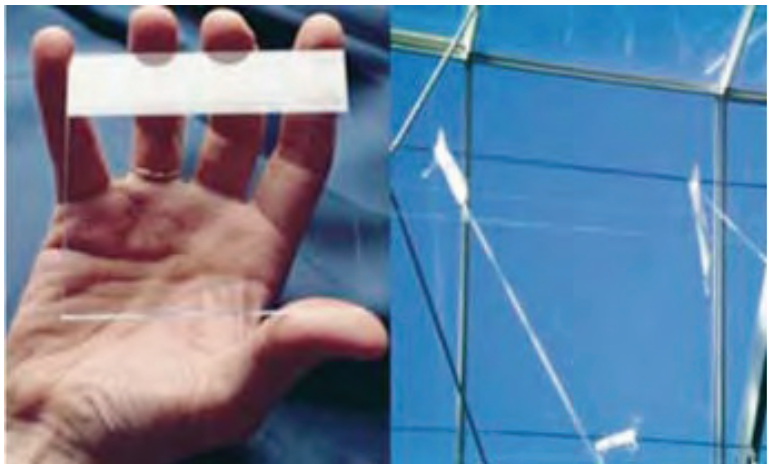


圖2. 數種抗反射(antireflex)塗料用以防止光的反射，使得光穿透率增加 5-6% (Bakker, 2009)

(二) 減少溫室能源的使用

1. 最小化遮網與絕緣材料所導致之能源損失

自然通風溫室能源損失的主要過程有：(1)來自溫室覆蓋的對流與輻射(2)經由通風的熱與潛熱傳輸。因此，改進絕緣並且降低通風是創造保能溫室的第一步。保溫網在溫室和環境之間增加額外的障礙並降低對流與通風損失；當可移動時，相較於固定的遮網或雙覆蓋材料，其對光穿透性影響較少。在荷蘭大約 80%與法國大約 35%的溫室地區都裝有保溫網。理論上，保溫網可減少 35-40%的能源使用，其主要取決於材料。

增加溫室覆蓋的絕緣值對溫室能源消耗有重大影響。然而，大部分固定絕緣覆蓋的主要缺點在於光穿透的減少與濕度的增加。發展具備高絕緣值與高光穿透性的材料是最具挑戰的問題之一。但實際的狀況是，二層與三層覆蓋材料的節能潛力幾乎從未達成，因為種植者總試著藉由增加溫室環境的除濕來補償其負面效果。

Lexan® ZigZag™溫室覆蓋材料(如圖 3 所示)是結合高光穿透(就直接光而言 90%，漫射光則為 80%)與高絕緣值材料的例子，相較於單層玻璃，每年可節省 20-25%能源(Sonneveld 與 Swinkels, 2005)。令人遺憾的是，由於額外成本、低的總經濟利益及溫室結構生產與修改問題，此種材料的大量實際應用尚未成功；未來有希望的選擇有塗佈 Anti Reflex 的雙面玻璃、micro V 處理的玻璃組合或三層系統 (Bot et al., 2005)。例如，塗佈 Anti Reflex 的雙面玻璃，可以容易地與當今溫室結構結合使用，由於結合高散射光穿透傳輸(82-86%)與能量削減(26%)，使能源效率增加了 40%。

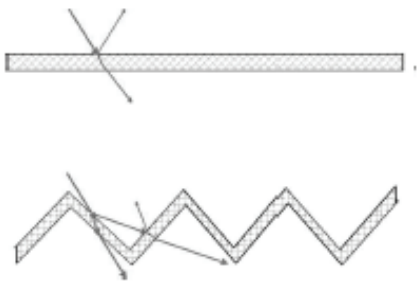
2. 控制通風與潛熱以最小化能量損失

以周年為基礎，從溫室到環境能量轉移的主要部分乃透過自然通風。因此，很多降低溫室能量投入的測試中，多集中在通風過程與其對熱與質量轉移的影響。在輻射與外界溫度相對較低時期，自然或強制通風常被用以防止高濕度，其與能源消耗的顯要(5 到 20%)部分有關。在提升與濕度控制相關能源效率的選項有：較高的濕度設定點、降低作物的蒸散位準，或以回收熱除濕(Campen 與 Bot, 2002)。

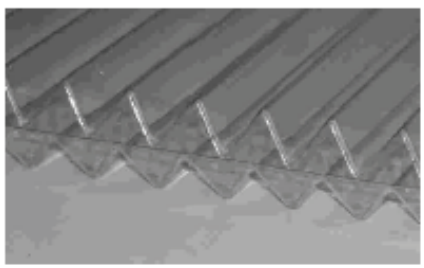
儘管高濕度通常與增加真菌疾病的風險及降低品質相關(例如 botrytis, blossom end rot)，在亞熱帶區域適度情況下，提高濕度對作物生產與品質可能有益，並因此增加能源效率。

蒸散的減少也對能源效率有正面影響，因為蒸散較少的作物把較少的水帶到空氣中，因此在低輻射狀況下濕度控制僅需較少的能量。兩種方式顯示可減少蒸散，包括使用抗蒸散劑(antitranspirants)與降低葉面積。抗蒸散劑結合較高的 CO_2 濃度，可在對光合作用與生長無影響下提升 5-10%能源效率。作物葉面積的控制性降低，例如甜椒的高葉面積指數，可在對生產無影響下降低能源使用；而摘除蕃茄老葉使葉面積減半降低 30%的蒸散，並對產量沒有不利影響(Adams et al.,2002)。

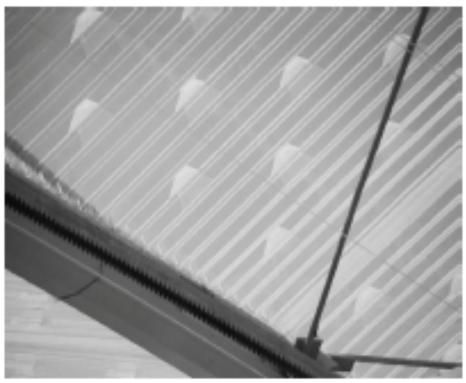
控制潛熱或使用沒有通風的完全密閉溫室可降低通風率以最小化能量損失，而此種操作需要技術性方法以解決避免高溫度與溼度(Opdam et al., 2005)。就半乾旱地區而言，具能源效益的除濕系統是基於熱泵的冷卻與除濕系統，並結合熱交換器與熱量回復使用(Buchholz et al., 2005)。然而，商業運作中，此種應用至今仍然有限，因為就作物生產與節能而言，經濟性的好處仍然無法符合額外費用的投入。



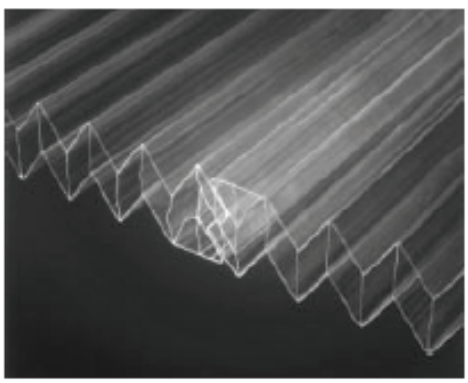
光束撞及平板穿透與反射之原理(上)與Zigzag板(下)



真空成形技術所製造第一雙層Zigzag結構的例子



真空成形ZigZag在內外層間有三角形間隔器



兩擠壓成型ZigZag Lexan嵌板結合在一起

圖3. ZigZag™溫室覆蓋材料

3. 具能源效益的冷卻

幾乎所有地區，特別是在南方緯度地區，就整年而論，需要有效率的冷卻系統以降低溫室內的空氣溫度。自然通風是溫室冷卻最常用的方法，而最佳化溫室幾何結構是設計自然通風系統的主要技術。屋頂斜度達 30^{o} 時通風率顯著增加，因此傳統水平屋頂的溫室可以對稱或不對稱的斜頂溫室加以替換。

遮蔭是被動性冷卻(passive cooling)的常用方法，安裝於溫室內部或外面的移動式遮蔭可改善冷卻系統，其可吸收或反射不同波長的光。熱鉻顏料的特定材料可用以降低熱負荷，但此種材料大部分也減低 PAR 位準。反射植物生長不必要太陽能源(近紅外光，NIR)的材料也可用於溫室覆蓋或遮網的材料(Hemming et al., 2006)。

不同的主動式(active)冷卻與機械通風系統的比較顯示，除了直接與非直接的蒸發冷卻外，其投資收益並不好。直接蒸發冷卻係透過細霧(misting)與風扇水牆冷卻給予最佳的結果，並且主要是透過對生產的影響而增加能源效率。

Kumar et al.(2009)綜合回顧夏季溫室降溫設計技術，同時也討論對溫室微氣候的影響與所適用的降溫技術，結果顯示除冷卻外，在溫室設計、新覆蓋材料的評估，以及區域氣候與農藝狀況的自然通風研究都是必須的。早期研究分析也顯示具大通風面積(15-30%)、在溫室屋脊與側邊提供通風、覆蓋 20-40 網目的防蟲網，以及被覆具白天可反射 NIR 而夜間可反射 FIR 特性材料的自然通風溫室適合熱帶與亞熱帶地區整年的作物生產。

4. 具能源效益的操作控制

高效率的溫室環境控制有助於改進具能源效益的溫室生產，而增加對作物生理的認識，以及作物與環境相互作用的知識，並結合有效率的溫室環境控制，可使溫室生產更具能源效益。實質上降低能源使用的方法之一是使用溫度累積(Temperature Integration, TI)，主要乃因很多作物是回應溫度累積而不是每日變化(diurnal variation)。TI 使用的第一個報告回溯至 20 年前，其係利用基於風速設定值的操作以提升節能，並且預報 5-10%的節省(Bailey, 1985)。

較常利用的 TI 策略是使用比正常氣孔溫度較高的溫度，並且在夜裡或陰暗天以低溫運轉進行補償。能量節省將取決於作物與允許的溫度波動，而每年達 16%的節省是可能的。在更密閉的溫室，此種方法被用於白天以降低冷卻功率；於夜晚當不需要 CO_2 時，結合正常通風也可降低所需容量與冷水總量，並使系統更經濟可行。

濕度控制策略也對由於溫度累積所致的節省有很大影響。當溫度下降時，降低通風與加熱導致相對濕度的增加，並且濕度控制可能抵銷由於 TI 所致的節省，而較高 RH 設定值與動態濕度控制可顯著地降低能源使用(Korner, 2003)。

在能源效率上欲獲得環境控制的最大利潤，控制必須不再追求環境因子或像加熱、通風與 CO_2 供應的作動器，而是具能源效益的作物生產與品質控制。這必須根基於控制系統，其中控制作動對作物生產和能源消耗的影響必須加以考量，而此種方法自 1980 年代初已被遵循了數十年。Challa 與 van de Vooren (1980)最先描述小黃瓜生產能源消耗與早熟(earliness)間的最優化常規。下一步是使用作物光合作用與蒸散上相對簡單的模式，隨後再接著更複雜的物理模式與光合作用模式。第一個應用例子是保溫網的操作控制，其中並針對生產的旺盛效應加以平衡。Dieleman 與 Kempkes (2006)指出就番茄而言，當延遲打開保溫網使暴露於 50-150 W/m^2 以上輻射，可在不影響生產下獲得達 4%的額外能源節省。

迄今，尚少考量作物生產和能源消耗的溫室線上控制模式，現有模式甚至很少被使用於溫室的線上控制過程中，因為其大部分並不適於線上控制使用。新環境控制技術的導入將增加能量效率，但透過簡單的改進，像是加熱與通風系統的硬體設計、改進感測器網路之準確與控制頻率，以及設定值的定期檢查等，也可大幅改進能源效率。

(三) 以其他永續資源代替礦物燃料有助於減低 CO_2 排放

由於 CO_2 的排放直接與加熱和冷卻溫室的礦物燃料使用有關，例如太陽能與地熱能、生物質量與廢熱之替代選項有助於減低 CO_2 排放目標。在荷蘭使用由熱電聯合系統(CHP)提供之廢熱與 CO_2，溫室產業節省大約 1×10^9 m^3 的天然氣，並把所產生的綠色電力出售到國家電網。儘管不在溫室層級直接節省能源，CHP 透過降低中心電廠的 CO_2 排放而在國家層級降低 CO_2 排放。不過，在其他國家的情況可能有所差異，因為 CHP 的經濟性目前可能不是合適的。生物質量和厭氣消化是礦物燃料外的另類選擇，但其可用性與巨大數量需求成為大規模應用的主要缺點。因為，1 百萬瓦生物質量來源需要大約每年 2500 公頓的乾物。在不同地區，地熱能(水溫>60^oC)可能是另一大有可為的選擇。世界上的多數地區(例如土耳其、德國)具有地熱潛力，其就溫室加熱而言可能是經濟可行的。2007 年第一個地熱加溫溫室在荷蘭被實現，其主要是一個利用 5 百萬瓦地熱源的番茄溫室(面積 7.25

公頃)，使用來自 1700 m 深度及 65 ^{o}C 的水進行加熱。目前，大約有 25 個計畫正在可行性研究或初次鑽探的階段。

Pereira(2002)指出利用海洋深層水的冷度，可以在熱帶沙漠地區為作物根區創造終年像春天的微氣候，其可產生熱帶、亞熱帶與溫帶作物生長的理想狀況，因而形成所謂的“低冷農業技術(Cold water Agriculture, ColdAg)”，其特點有：1.根圈溫度控制；2.由水汽冷凝至土壤形成自我灌溉；3.根葉間溫差促使植物快速生長(3 倍於傳統)，產品並具高糖與芳香成分；4.由操縱植物休眠(強迫或打破)至每年多輪作生產；5.完全不排放廢水。

(四) 可供溫室加熱與降溫使用的組合系統(Sethi 與 Sharma, 2007c)

1. 地對空氣熱交換器系統

利用地球質量，可以建立良好的地對空氣熱交換器系統(Earth-to-Air Heat Exchanger System, EAHES)。由於大地整年溫度(26-28℃)幾乎固定，大地土地勢能可以在夏天時用來冷卻溫室或畜舍。在此種狀況，溫室熱空氣經由所埋管子(2-4 m 深度)而循環並將熱驅散至地下土壤中。不過，文獻回顧評論顯示很少的研究專門探索供農業溫室使用 EAHES 的冷卻潛能。

使用 EAHES 調控溫室狀況的模擬研究由 Levit et al.(1989)在阿根廷 Pampa 地區潮濕的 43 x7.2 m^2 農業溫室中執行，溫室係以單層 PE 塑膠布(厚度 150 lm)所覆蓋，管子係由埋在 1.2 m 深度的鍍鋅鐵板做成，其冷卻性能未能確切知曉。Schiller (1992)開發使用地管被動冷卻的暫態數值模式以預測地對空氣熱交換器系統的性能。Mihalakakou et al. (1994)研究地表覆蓋對於單與多排平行埋管冷卻性能的影響，調查埋在土壤下此兩系統的冷卻潛能，並與相同系統被埋在短草覆蓋土壤下的冷卻潛能相比較，結果顯示土壤表面覆蓋可能是改進 EAHES 性能的可控制因子。Santamouris et al. (1994)描述一 1000 m^2 被動式太陽能農業溫室原型的設計、建造與操作，儘管溫室被以降低熱損失而設計，並在每日與季節性基礎上增加有用的太陽能獲得，而 EAHES 冷卻潛能被發現是非常重要的。

Santamouris et al. (1995b)針對農業溫室降溫節能方面研究 EAHES 的性能，就特定的玻璃溫室的參數分析被進行以說明管長、管徑與管內風速對此系統性能的影響。由裝有 4 支埋管、1000 m^2 玻璃纖維覆蓋的溫室所收集室內氣溫的測量數據，被用與計算所得數據相比較，結果發現非常吻合。Kumar et al. (2003)開發數值模式以預測 EAHES 的節能潛

能與大樓的被動式熱能性能，此模式針對在印度 Mathura 相似隧道的試驗數據進行驗證，結果被使用以研究非空調大樓的熱能性能，80 m 地下隧道的冷卻潛能(19 千瓦)被發現足夠維持 27.65℃的平均室溫。

Ghosal et al.(2004)發展簡化分析模式以研究再循環型式(recirculation type) EAHES 結合溫室(位於印度 Delhi)的整年效力，其計算係針對典型的夏天而做，溫室的空氣溫度在夏季被發現比相同溫室沒有 EAHES 運轉下較低平均 3-4℃。Ghosal 與 Tiwari (2006)執行的另一項研究中，熱力模式被發展以調查藉助於 EAHES 下使用地底所儲存熱能供溫室降溫的潛能。針對 EAHES 結合溫室的參數研究說明埋管長度、管直徑、空氣的質流率、地下深度與土壤類型對溫室氣溫的影響。具有 EAHES 試驗參數的溫室空氣溫度在夏天，發現平均比相同溫室但沒有 EAHES 者低 5-6℃。

除了這些研究，Santamouris et al. (1995a)與 Agririou et al. (1996)也探索大樓冷卻用途 EAHES 的使用，並且發現其在降低內部氣溫非常有效，因為與溫室相較此種應用並沒有直接的太陽輻射進入大樓圍區。總之，應用地對空氣熱交換器系統者與控制溫室相較可以降低內部氣溫 3-5℃。不過，使用 EAHES 的主要缺點在於土壤鑽挖，並把管子置放達 2-4 m 深的費用。在此種深度管網的水平置放與配管並非容易，一但置放管路狀態與來自接點的滲漏都無法檢查。而在土壤壓力下金屬管路的腐蝕與塑膠管的劣化也使長時期計劃中此種系統變得較不可信任。

2. 地下儲水層連結洞流熱交換器系統

Sethi 與 Sharma (2007a)在印度 Chandigarh 的 Panjab 大學設計並開發地下儲水層連結洞流熱交換器系統(Aquifer Coupled Cavity Flow Heat Exchanger System, ACCFHES)，以供 24m^2 地板面積、種植辣椒的農業溫室加熱與冷卻時使用。此系統使用由地表灌溉管水池而來地下儲水層的水進行溫室降溫，其幾乎整年都在大約 24℃的恆溫。簡單的蒸發冷卻過程在極端夏天狀況也被增加至此現有系統中，試驗結果顯示極端夏天狀況下內部房間氣溫比環境氣溫低 6-7℃。Sethi 與 Sharma (2007b)也發展溫室整合 ACCFHES 的熱力模式，此模式也針對先前研究所獲得試驗結果進行驗證，據觀察此溫室降溫的預測數值與測定數值非常接近，並顯現 3.12%的均方差(mean square deviation, χ^2)，參數研究也被進行以優化系統參數。

(五) 具能源效益溫室的新設計

儘管個別節能組件的開發與運用實施能導致能源的節省，欲達成在 CO_2 排放與能源產製溫室上有雄心目標的唯一方法，在於整合包括覆蓋材料、加熱與通風/除濕、控制演算法及能量轉換系統之節能溫室系統(energy conservative greenhouse systems)。Bot et al.(2005)所發展理論太陽溫室概念(如圖 4 所示)乃具能源效益設計的好例子，包括能量轉換技術與最佳控制的所有組件都被合併在內。此太陽溫室計畫的目標在於不使用礦物燃料而開發高價值作物生產用的溫室系統。系統概念是在夏天收集儘量多的熱以平衡冬天最小化的能量需求。結合動態控制上的控制演算法，此系統可導致60%的總可實現能源節省(total realizable energy saving)。這使得永續能源供應變成可行，而其所需每公頃溫室只要 600 千瓦的能源可由風力或太陽能光電板而獲得。

藉由完全與半密閉溫室(Opdam et al., 2005)，設計的下一步係要在夏天抽取總過剩熱並以溫度在 25-30^{o}C 的熱水形式儲存在長期熱儲存器(地下蓄水層)：包含砂層的隔絕水，通常深度在 100-200 m。在冬天時期，熱被使用熱幫從地下蓄水層中抽提，並重新使用於所謂的“能源產製溫室”以加熱溫室本身、相鄰溫室或建築物(圖 5)。

欲達到這目的，把溫室當成太陽能收集器的性能必須藉由進一步減低熱損失與使用非常有效熱交換器(圖 6)以最大化熱收集而加以最大化。在荷蘭 Bergerden 所謂的“能源產製溫室”係使用這個系統的第一個商業規模溫室的第一個試驗，其顯示溫室的淨能源剩餘尚無法達成，因為輸出受限於種植者的溫度限制範圍與為最小化預期對作物不利影響所致遮蔭網的頻繁使用。此熱產製系統的缺點是系統所傳送低位準的能量(水在 40^{o}C 下)，此需要修改加熱系統而且必須在溫室的鄰近地區被直接使用。不過，從溫室到都市環境的熱傳遞(溫室在能量網格中)在荷蘭人口非常稠密的 Westland 地區是一真正選項。目前至少一項商業計畫正在發展的階段，而幾種熱產製溫室的改進設計正在 Bleiswijk 位於 Wageningen UR Greenhouse Horticulture 所謂能源產製溫室創意與示範中心(Innovation and Demonstration Centre for Energy Producing Greenhouses)內測試(圖 7)。

荷蘭 Zonneterp 溫室村(圖 8)係包括生態住宅區作為能量產製溫室進一步發展之示範計畫，乃 Innovation Network 有關溫室村之成果，其呈現具有分散式水與廢水處理設施，並以溫室產生熱能提供社區之設計。此種設計係基於在夏天從太陽輻射捕獲過剩熱之創新溫室，其熱能被儲存在地下自然水池(地下儲水層)中，並在夜裡或冬天使用以暖和溫室。能量平衡顯示仍有足夠能量剩下可用以加熱大量之房子(2 公頃溫室可以加熱達 200 戶房子)。另外，溫室可提供自來水、處理廢水並產製電力，整個溫室組合在能

源與水方面係屬自足，並循環再利用營養與碳。因此，溫室村是符合生態永續性、環境友善性與經濟可行性之解決方案。(Andel et al., 2007)

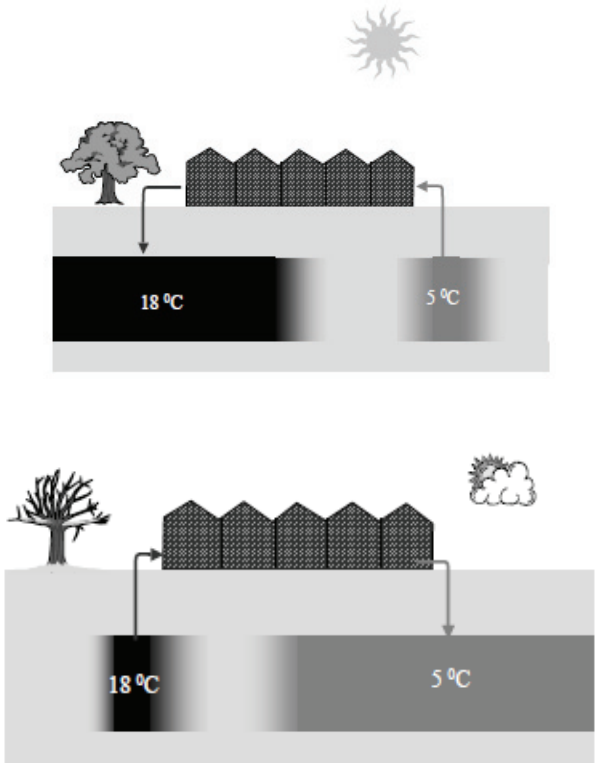


圖4. 地下蓄水層示意圖(Bot et al., 2005)：夏天時(上)溫部被填充而冷部被清空，冬天時(下)溫部被清空而冷部被填充。

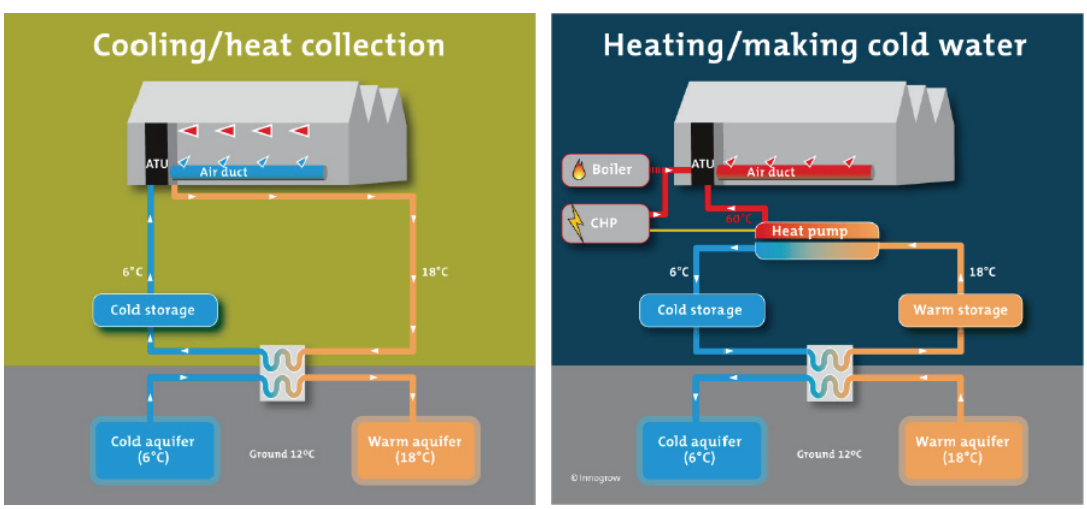


圖5. 密閉溫室的作用(摘自Innogrow公司)



圖6. 在“能源產製溫室”中，把溫室當成太陽能收集器的性能必須藉由減低熱損失與非常有效的熱交換器以最大化熱收集。



圖7. 幾種熱產製溫室的改進設計正在Bleiswijk位於Wageningen UR Greenhouse Horticulture所謂能源產製溫室創意與示範中心內測試。

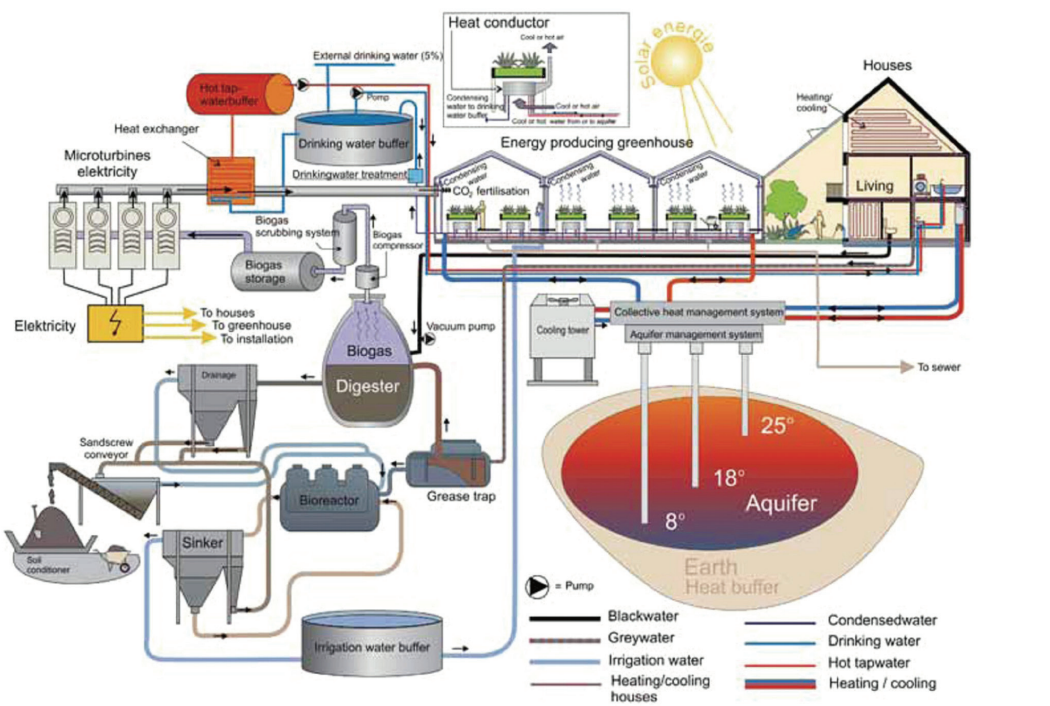


圖8. 溫室村之技術布局(Andel et al., 2007)。

試圖結合溫室生產與電力生產以取代溫水生產，Sonneveld et al. (2006) 設計一具有拋物線 NIR 反射溫室覆蓋的系統。這種覆蓋反射並且使 NIR 輻射聚焦在一特定 PV 電池或太陽能收集器上以產生電力(圖 9)。在實際 100 m^2 原型測量的最先結果顯示此系統所產生電與熱能的潛能可能達到 15 kWh/m^2 的電與大約 50 kWh/m^2 的熱能。但是，目前由於能源當今價格水準、作物生產的有限增加，以及所需複雜與昂貴的裝置，完全密閉溫室的大多數系統和概念並非具有經濟性競爭力，而且只能以從地方與國家政府的特定支援而實現。

對世界上半乾旱地區來說，就合併高水準技術並打算採用密閉或半密閉溫室概念之創新與具能源效益的溫室而言，某些有趣的設計已經實現。如圖 10 所示，在 Watergy 計畫內，一完全密閉溫室被發展，其係基於創新的熱交換器，並追求水的完全再循環((Buchholz et al., 2005)。此真實雛型顯現大有可為的結果，但是此完全密閉溫室之經濟可行性如同北方緯度地區一樣仍是主要瓶頸。

世界上加熱可能是方便但基本上並不需要的大部分地區，發展具能源效益溫室系統的主要途徑仍是基於被動式溫室(passive greenhouses)的發展。由於此種處境下，氣候調控的能量輸入非常有限，在被動式溫室的操

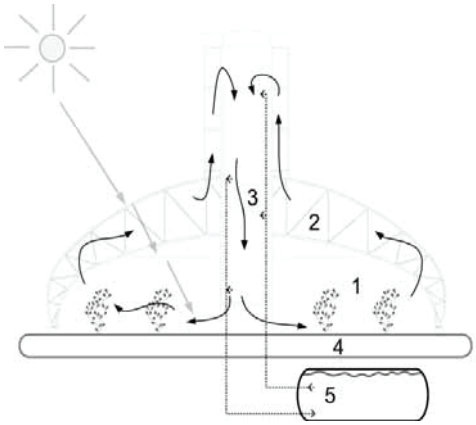
作中減少其他牽涉 CO_2 排放的過程被加以考慮。生命週期分析(Life Cycle Analysis)被用於整個生產過程以確認那些組件是能源消耗較多的。對於不加熱的溫室，溫室結構(基礎和圍牆)以及輔助設備(灌溉管、覆蓋塑膠與作物支持組件)占總氣體排放的 51%。新設計集中於基礎系統的重新設計與可回收利用混凝土的使用以降低能源使用。由於肥化生產與使用是番茄生產能源消耗(大約排放的 36%)強大影響的另一因素，更被動溫室的總能量效率可以削減肥化而達成。



圖9. 使用反射NIR供電力生產之電力產製溫室雛型。



在西班牙Almeria剛完成結構的WATERGY溫室



白天期間溫室內空氣與水分之移動

圖10. WATERGY溫室(Speetjens et al, 2005)。

四、 世界節能政策趨勢

(一) 荷蘭節能政策與「綠標溫室」(Nederhoff, 2004)

荷蘭具有嚴厲的環境法律以調節能源使用、農藥使用與營養(肥料)排放，這些方案農民雖害怕，但荷蘭政府對於能完成者(good achievers)亦提供若干獎勵，例如補助、稅率抵減、投資支持與降低利率。

1. 荷蘭政府節能政策之規定

2002 年 1 月 1 日開始，荷蘭對面積超過 2500 m^2 的溫室實施新法則 AMvB (Besluit Glastuinbouw)，其主要是基於三項其他法律並合併 1997 年產業與政府間簽訂的公約，法則定義種植者被允許使用有關能源、營養與農藥的數量，每位種植者必須負責達成個人目標，其溫室產業 2010 年之總目標為：

(1)相較於 1980 年，能源效率提升 65%。

(2)永續能源之貢獻增加 4%。

(3)相較於 1984-1988 年，農藥使用減少 88%。

(4)相較於 1980 年，磷與硝酸鹽肥料之釋放減少 95%。

2. 記錄與報告義務

此法律(AMvB)要求種植者做許多記錄與報告，生產計劃並於每年 11 月前開始。此計劃告訴種植者可施用多少能源、肥料與農藥，為達成 2010 年之目標，其數量每年均減少。每位種植者必需將記錄保留至少 5 年，其焦點集中在記錄簿、年度報告(每個種植者在 5 月 1 日前提

送)與包括所有文件的環境資料，可以理解的是，強制記錄與報告對種植者而言是相當大的負擔。

3. 其他方案與「綠標溫室」

目前種植者有許多系統可以使用於環境與能源議題的強制記錄與報告，也有其他系統可協助計算與執行行政作業。所謂「綠標溫室」，是規劃新溫室或更新既有溫室時環境書面作業的行政工具。綠色標章協助向政府展示新溫室將是環境友善、具能源效率，也包括植物營養與作物保護。如果規劃符合標準要求，種植者會收到綠標溫室的綠色標籤憑證(簡稱綠標憑證)，並可申請獎勵。

4. 要求

就溫室而言，綠標方案定義兩項要點，即需符合之基本要求，與種植者可獲得點數的投資選項。基本要求規定結構件、牆、屋頂與檐槽(gutter)之細節，大量加熱溫室(heavy-heated greenhouses)之其他基本強制要求，包括具溫度、濕度與二氧化碳精準感測器之氣候控制電腦，加熱也須完成詳細之準則，而且必須有若干生物控制。有趣的是，使用由鍋爐而來廢氣中之二氧化碳也是強制的。此外，種植者也可選擇可獲得點數的投資選項(包括用水量、能源消耗量、營養成分、農藥使用量和光污染五方面，種植者可聚焦於一或數個方面)，亦即裝設例如保溫網、冷凝器、鍋爐或管線上之絕緣體、熱緩衝桶與外部來源之廢熱等節能設備。每一選項給予一些獎勵點數。對番茄溫室而言可以獲得綠標憑證之點數數值為 110；其他大量加熱溫室則為 100；而具輕加熱或熱氣加熱之溫室則為 85。達到申請“門檻”者可得到“綠色標籤”，並被納入為期 10 年之評估監督期，其評估結果有三，分別為同意延長(最佳)、限期改正與摘牌(最糟糕，亦即收回“綠色標籤”)。

5. 獎勵

如果獲得足夠點數，亦即計畫投資已足夠，種植者就會獲得溫室之綠標憑證，此給種植者例如 MIA、VAMIL 與綠色投資等獎勵之權利。MIA 是給投資環境友善生產設備之稅金扣除；VAMIL 提供資金流動與利率之商業利益；綠色投資幫助環境友善之投資。這些獎勵被認為非常值得，顯然地也有未達成所設定目標之處罰，種植者也可能不使用綠標溫室方案而直接申請減稅獎勵，但這樣他必須自己做研究與文書作業。綜觀荷蘭綠標溫室制度之實施，效果卓著，主要在於溫室種植業之能耗大大降低、技術創新方興未艾，以及循環再利用得到推廣。

(二) 荷蘭的能源稅與 CO_2 排放權(Nederhoff, 2006)

在荷蘭溫室加熱通常使用天然氣，其燃燒產生 CO_2 與氧化氮(NOx)，據信此兩"溫室氣體"導致全球暖化。荷蘭保證相較於 1990 年，2008-2012 年期間會減少 6%溫室氣體的排放。荷蘭溫室種植者依法需申請排放 CO_2 與氧化氮，以及完整記錄這些氣體排放的許可證。至目前為止已有一系統(GLAMI)，憑此種植者必須保持他們的能源使用在某最高限度下。每種作物都訂定其最高限度值，每年並以某百分比降低，此系統將逐漸由歐洲方法(CO_2 排放權交易)取代。在荷蘭 CO_2 交易的第一階段於 2006 年 1 月 1 日開始，主要牽涉非常大的能源用戶，但是相當數目之種植者在 2008 開始之第二階段加入。好消息是溫室種植者從他們的努力中獲得某些回報，他們支付降低稅率的貨品及服務稅(GST, Goods and Services Tax)，以及降低之天然氣能源稅。而且，他們可以申請節能技術與使用永續能源的補貼與稅款獎勵。

1. 能源稅

荷蘭天然氣的價格由至少 4 個部分組成：天然氣成本、分配成本、能源稅與貨品及服務稅，"尖峰"需求與總需求也影響價格。由於供應者間之競爭激烈，天然氣價格變動很大。Nederhoff (2006)指出能源稅被具體指定從非常小至極大用戶等 5 個類別(表 2)，此處數據是以十億焦耳(Giga Joule)與紐西蘭元表示(從歐元和 m^3 天然氣轉換而來)。第一類(大約少於 175 GJ/year)是非常小的種植者或很少使用溫室加熱者，他們只支付其他工業所必須付能源稅的 10%，亦即每十億焦耳 0.71 至 1.07 紐西蘭元。對中型的溫室來說能源稅是每十億焦耳 0.88 紐西蘭元。極大的溫室組合將進到最後類別(每十億焦耳 0.40 紐西蘭元)，由於他們的操作規模這些種植者可能最先參加 CO_2 排放權交易。

表2. 2006年荷蘭的天然氣能源稅(Nederhoff, 2006)

天然氣消耗 每年十億焦耳(GJ)	一般工業 紐西蘭元/ GJ	溫室產業 紐西蘭元/ GJ	在紐西蘭具對應天然氣消耗之溫室規模
少於 175	7.75	0.71	非常小，或沒有管線加熱
175-6,000	6.37	1.07	在紐西蘭多達0.4 ha
6,000 - 35,000	1.75	0.88	中型，在紐西蘭0.4 - 2.5 ha
35,000 - 350,000	0.60	0.60	在紐西蘭2.5 - 25 ha
多於350,000	0.40	0.40	極大，在紐西蘭多於25 ha

2. 排放權

能源稅是一種手段，但歐洲國家同意做更多以降低“溫室氣體”的排放，包括 CO_2、甲烷、氧化氮與氧化亞氮氣體。原則上是為限制排放溫室氣體的權利，並且發行可以被交易的“排放權”。例如，CO_2 排放交易是允許 CO_2 排放的買或賣之權利。在荷蘭 CO_2 排放交易的第 1 階段自 2006 年 1 月 1 日開始。對於大工業，NOx 排放交易自 2005 年中開始，其他氣體也被跟隨採行。該計畫被納入歐洲規章，並且很可能其他歐洲國家也會執行，歐盟已針對溫室氣體排放權交易訂定體制與規章。

3. CO_2 排放權交易

幾年前歐洲國家同意每個國家可以排放多少 CO_2，並且分配 CO_2 排放權給每個國家。政府任命“排放管理機構(Emission Authority)”分配他們國家內的排放權。經過強烈討論後，某分配計畫在荷蘭被建立，並且由“歐洲”批准，此分配計畫 2004 年首次宣佈，並於 2005 年修訂，且具有約束力。CO_2 排放權交易的最先參加者是真正的大工業，某些異常大的溫室企業也具備資格。荷蘭政府從歐洲獲得許可讓較小與中型能源用戶(溫室種植者)直到 2008 年 1 月 1 日第二階段才開始。此乃因登記、監控與報告的費用對於較小公司是不成比例的，但在兩年後將會更好。在 2008 至 2012 年 CO_2 排放權交易的第二階段，預計會有 50 至 80 處較大溫室會被納入。

4. 對種植者而言排放權交易如何運作

每年一開始，種植者會從排放管理機構得到 CO_2 排放權，此權利是寫在正式權利登記中。在年底種植者必須準確報告他已經使用多少能源，以及他已經排放多少 CO_2，這份報告必須由獨立稽核員加以證實。種植者必須有足夠的權利以涵括排放的 CO_2 數量。在一年的過程中，如果他認為他需要更多，種植者可以買更多的權利，或者如果他希望也可出售權利。不僅參加的種植者與工業可以交易排放權，其他公司與個人也可以。交易是透過某種股票市場、銀行或中間人完成，每個交易者就他們的權利需要一個帳戶。

5. 稅捐獎勵與其他好處

可理解的是目前能源稅被厭惡，未來的 CO_2 排放權交易系統被視為巨大負擔。此事的正向面是荷蘭種植者得到在節能技術投資上的顯著補貼與稅捐返還。這是政府可以繼續控制荷蘭溫室產業未來發展的模式，也總是與產業合作完成。他們認可一符合資格給予支援的技術清單，並且每年更新此清單，例如鼓勵永續能源的使用與共生發電機的實現，結果很多溫室種植者現在都有共生發電機(CHP＝ 熱電聯合系統)，

並且輸送電力至電力網絡。用於共生發電機的天然氣並沒被課徵能源稅，而輸送至電力網絡的電力則產生報酬(remuneration)。稅捐獎勵與補貼也強烈激勵了其他發展，包括工業或電廠餘熱能源的使用、相同來源的大量 CO_2、聚落、生質燃料的先導計畫、在較深土壤的熱儲存、密閉溫室，以及更多其他相關。此外也有例如研究與建議的服務可提供種植者能源議題的幫助，其經常是需要費用，但是有時是部分或間接補助。

(三) 紐西蘭溫室種植者的碳稅費用(Nederhoff, 2005)

1. 碳稅

據 Nederhoff (2005)報導紐西蘭政府打算從 2007 年 4 月 1 日導入碳稅，並計算有關各種燃料必需花費的碳稅，對排放 CO_2 的所有礦物燃料，包括煤、天然氣、柴油、汽油和重油都將收費，碳稅最初將訂在每公噸 15 紐西蘭元，並且將只在國際市場上排放單位價格實質變動偏離此設定值時才被調整，2008-2012 期間其最大限定值將被訂在每公噸 CO_2 25 紐西蘭元。

2. 每能源單位或體積的碳稅

各種燃料碳稅的計算是基於它們的熱能含量與碳含量(技術資料取自紐西蘭能源資料手冊(By J.T. Baines，ISBN 0-473-01662-1)，其中需要某些轉換，例如，煤是以重量(公斤或公噸)量測，而且其熱能含量經常以英國熱量單位(British Thermal Units, BTU)表示。油與天然氣是以體積(公升與 m^3)量測，而且其熱能含量以焦耳(J)、百萬焦耳(MJ)、十億焦耳(GJ)或千瓦小時(kWh)表示。

碳稅被假設在每公噸 CO_2 排放 15 紐西蘭元的稅率，如果被定在不同的水準，數值必需調整。例如若碳稅被訂在 10 紐西蘭元，那麼所有數值將降低 1/3；而若訂在每公噸 CO_2 25 紐西蘭元，那麼所有數值將提高 2/3。

3. 每公頃碳稅

為了將這些數值賦予意義，Nederhoff (2005)計算每公頃溫室之碳稅費用，假設各種能源的投入介於 500 與 2500 MJ/m^2/year 之間(這等於 5,000 至 25,000 GJ/ha/year)。代表很多種植者的良好指標是 1500 MJ/m^2/year，此數值於表 3 中使用，表中也顯示多少公噸煤或多少 m^3 天然氣體等於 1500 MJ/ m^2/year。2000 MJ/m^2/year 或更多的能源使用對於密集加熱不是奇特的，然而接近 1000 MJ/m^2/year 的能源使用對於較少密集加熱的種植者而言也是可能的。而 500 MJ/m^2/year 非常低的能源使用只適用於冬天不加熱的溫室。

表3. 在1500 MJ/ m^2/year能源使用下之燃料使用量、CO_2排放量與碳稅 (Nederhoff, 2005)

燃料	燃料使用量	CO_2 排放 (Kg $CO_2/m^2/y$)	碳稅 ($/$m^2$/y)
煤，含瀝青	46.7 kg/m^2/y	133	2.00
煤，含次級瀝青	66.4 kg/m^2/y	137	2.05
煤，所有褐煤	100.0 kg/m^2/y	143	2.14
煤，所有 NZ 生產	59.8 kg/m^2/y	136	2.03
燃料油-輕	37.2 liter/ m^2/y 33.7 kg/m^2/y	109	1.63
燃料油-重	36.8 liter/ m^2/y 34.8 kg/m^2/y	112	1.68
柴油	39.2 liter/ m^2/y 32.8 kg/m^2/y	103	1.55
丙烷	29.8 kg/m^2/y 58.6 liter/ m^2/y	89	1.34
丁烷	30.3 kg/m^2/y 52.8 liter/ m^2/y	92	1.38
液化石油氣(LPG)	30.0 kg/m^2/y 56.6 liter/ m^2/y	91	1.36
天然氣	38.5 m^3/ m^2/y 416.7 kWh/ m^2/y	79	1.19

表 4 顯示各種燃料之碳稅範圍每十億焦耳能量從 0.79 紐西蘭元至 1.43 紐西蘭元，或每 1000 千瓦小時(1000 kWh 或 1 MWh)能量從 2.85 紐西蘭元至 5.14 紐西蘭元。與燃料重量有關，其範圍從每公噸燃料 21 紐西蘭元至 48 紐西蘭元。天然氣並非以公噸量測，而是 m^3 或 GJ。就平均能源消耗 1500 MJ/ m^2/year 的溫室而言，每公頃碳稅範圍由少於 12,000 紐西蘭元至超過 21,000 紐西蘭元。

顯而易見的是，碳稅將加在“正常”能源價格之上，而檢視碳稅所引起價格增加的百分比會是有趣的，大部分情況其顯然在現今價格的 10 至 30%範圍。尤其注意附加相當高碳稅的燃料，例如煤，通常具有相當低的“正常”價格，因此其總價可能較別種具有低碳稅燃料的價格低。由於有不同類型的煤、天然氣與油等，特殊情況的碳稅費用可能與表中所顯示者有點不同。

五、 溫室節能措施

在北方地區(加拿大、英國、荷蘭等)加熱與冷卻溫室之成本可能達總操作成本的 70 至 85%，而在較溫暖的地區(美國西南方、墨西哥、西班牙、以色列等)其成本仍佔總操作成本的 50%。因此，顯見加熱與冷卻是溫室操作預算之顯著部分。降低加熱與冷卻需求之任何措施也將降低這些費用，並且將因此增加利潤(Rorabaugh, 2002)。溫室操作者可以做某些事情以降低能源消耗，因此改進能源效率，一般從最容易達成、可以獲得最好結果，或最便宜的行動開始，其取決於各種情況。

表 4. 各種燃料的主要特性與碳稅(Nederhoff, 2005)

不同燃料的主要特徵						稅率每噸 CO_2 $15 之碳稅		
燃料	單位	碳含量 (%)	能量含量	CO_2 排放 ($kgCO_2$/ kg 燃料)	CO_2 排放 (kg/GJ)	碳稅 ($/GJ)	碳稅 ($/MWh)	碳稅 ($/tone 燃料)
煤，含瀝青	kg	78	32.1 MJ/kg	2.86	88.8	1.33	4.80	42.84
煤，含次級瀝青	kg	56	22.6 MJ/kg	2.06	91.2	1.37	4.93	30.96
煤，所有褐煤	kg	39	15.0 MJ/kg	1.43	95.2	1.43	5.14	21.45
煤，所有 NZ 生產	kg	62	25.1 MJ/kg	2.27	90.4	1.36	4.88	34.09
燃料油-輕	liter		40.3 MJ/ liter		72.5	1.09	3.92	
	kg	88	44.5 MJ/kg	3.23				48.39
燃料油-重	liter		40.8 MJ/ liter		74.8	1.12	4.04	
	kg	88	43.1 MJ/kg	3.23				48.39
柴油	liter	86	38.3 MJ/ liter		68.7	1.03	3.71	
	kg	86	45.8 MJ/kg	3.15				47.29
丙烷	kg	82	50.4 MJ/kg	3.01				45.09
	liter		25.6 MJ/ liter		59.6	0.89	3.22	
丁烷	kg	83	49.5 MJ/kg	3.04				45.64
	liter		28.4 MJ/ liter		61.4	0.92	3.32	
液化石油氣 (LPG)	kg	82	50.0 MJ/kg	3.02				45.31
	liter		26.5 MJ/ liter		60.4	0.91	3.26	
天然氣	m^3	68	39.0 MJ/m^3					
	kWh		3.6 MJ/kWh		52.8	0.79	2.85	

Nederhoff與Houter(2006)歸類溫室加溫方面之節能措施如下：

(一) 提升能源效率(透過降低能源投入與/或在沒有增加能源使用下增加產量)

這可以廣泛之措施達成，包括品種選擇、好的繁殖、植物管理、生產系統、給水、施肥、氣候控制與 CO_2 增添等，而作物記錄也是改進生產的工具。

(二) 修理損壞的設施或用具

設施的損壞可能造成冷與潮濕的地點，具 1℃較低溫度的地方會有 5%之較高相對濕度，而在此種位置的植物生長落後並且容易爆發疾病。

(三) 設備與感測器的維修與服務

髒的鍋爐可能有 5-10%的較低效率，其意味著增加 5-10%不必要的燃料成本。測量空氣濕度之濕球溫度感測器，必須保持潮濕，如果芯布(wick)是乾燥的，空氣濕度的讀值將太高，甚至達 100%。控制器於是透過啟動加熱與/或排氣而努力克服此被誤認的高濕度，因此花費能源。

(四) 進行升級

舊鍋爐可以現代有效率的鍋爐加以替換，並且可能短時間內回本。熱空氣加熱可以升級至熱水管加熱，可立即增加生產並降低疾病問題。安置在溫室高處的加熱管，可以降低下來。將熱傳遞至需要的地方是較有效率的，亦即接近植物，而不是接近屋頂的地方。在土壤裡生長可以改變成水耕生長，其導致較佳的生產與較好的控制能力。

(五) 絕緣溫室

溫室透過屋頂與牆而損失熱量。就雙層塑膠被覆而言，能量損失比單層塑膠或單層玻璃少，但是光的傳送也較低。

(六) 絕緣加熱設備

第一優先應該先將外面的管路作包覆(legging)處理；第二優先應該將從鍋爐來的熱水輸送管作包覆處理；第三優先是絕緣溫室內之熱水輸送管。由於在溫室內部損失熱量並不像在外面那麼糟，但熱的管路導致溫度不均，會使得植物生長參差不齊。

(七) 安置節能技術

調節天然氣控制閥、燃煤供應的變速螺旋、加熱系統的變速幫浦、煙氣凝結器(僅限燃氣輪機)、熱儲存桶(/緩衝桶)與保溫網(/熱力網)等。

(八) 透過電腦實施智慧能源(energy-wise)的氣候控制

溫度累積是先進溫室管理溫度的一種方法，其主要是大多數成熟植物不需要一直維持精確的溫度，他們能在短時期內接受較低溫度，只要稍後有較高溫度予以補償即可。因此當加熱費用昂貴時，加熱可往較低溫調整。

在沒有生產損失下，此種溫度控制方式可節省 5-10%的加熱成本。

(九) 避免溫度梯度

(十) 改變至其它能源

可使用來自電廠或其他熱源的熱。在某些地方可以選擇地熱的熱能，以及利用來自土壤或地下的低溫熱能。

(十一)安裝共生發電機(電熱綜合系統)

共生發電機是靠天然氣或油的引擎產生熱與電，此熱可用於溫室加熱，而電可使用供幫浦或其它地方，或可被出售。此種共生發電加熱節省成本 16-18%。

(十二)增進知識

(十三)記錄與分析氣候數據

記錄能源消耗並使其與氣候狀況相結合，可幫助理解能量需求，尤其計算能源效率(每單位能源的產出)是有用的，不做任何投資下光記錄本身可導致 5%的能源節省。透過比較自己擁有的數據與參考數據，種植者可決定是否有節能的行動需求。

(十四)更換非常舊的溫室

陳(2010)報告農業生產運用高效節能科技趨勢論壇中，台大方煒教授提出溫室節能策略如下：

(一) 溫室挑高設計，當溫室高達 6～7 公尺時，使用遮陽網搭配自然通風，可以不使用風扇與水牆。

(二) 連棟與大規模溫室設計，相同面積下連棟溫室比多間單棟溫室節能，規模放大也比較節能。

(三) 重視溫室之保溫、隔熱與氣密性。

(四) 使用保溫膜，可縮小加溫與降溫所需之空氣體積。

(五) 寒流期間於夜間拉上遮陽網，可減少夜間輻射冷卻而導致熱能的散逸。

(六) 溫室的加、降溫設備應接近植物所在的區域。

(七) 考量植物的生理生長，並提高育成良率。

(八) 以熱泵系統取代鍋爐，在使用正確的取熱設計、主機及供暖設計下，耗用 2 度電所產生的熱能約等於鍋爐燃燒 1 公升柴油或重油。

(九) 進行雨水與冷凝水的回收。

(十) 改用發光二極體進行人工補光。

(十一) 考量太陽能與電能的再利用，利用太陽能發電供應幫浦打水進行吸收太陽熱能。

(十二) 利用水的三相變化，結合相變材料的儲熱能力，使用自然能源。

(十三) 零耗能溫室，利用地下儲存夏（冬）季熱（冷）能供冬（夏）季使用。

六、 國內展望

(一) 技術方面.

綜觀溫室節能技術之回顧，具能源效益溫室的設計包括溫室(當成太陽收集器)的最佳化、透過生長環境的較佳控制以提升生產，以及延伸生長季節。對溫和的氣候來說，有潛力的方式是具有冷卻、熱回收與最佳化環境控制的氣密溫室。對乾旱的狀況來說，主要步驟是有效率的自然通風、冷卻，並且在夏天降低進入溫室的太陽能流。而對於一點也不使用礦物燃料的被動式溫室，節能步驟可以藉降低溫室結構、灌溉、輔助設備與例如肥化等能量輸入而做到。除了能源使用的減少外，欲達成具能源效益生產溫室之目標，不同礦物燃料的替代選項(例如廢熱與太陽能)的使用是必要的。不過，所有新設計的實際應用取決於經濟可行性，其導致世界上不同地區的不同解決方案。

而就國內狀況而言，尤其必須注重溫室降溫，若干研究缺口臚列如下：

1. 具白天期間反射 NIR 而夜間反射 FIR 特性被覆材料之開發或應用。
2. 降低與濕度控制有關能源消耗之研究(較高的濕度設定點、降低作物的蒸散位準，或以回收熱除濕)。
3. 具能源效益的操作控制(例如溫度累積)之研究應用。
4. 具能源效益作物生產與品質控制(作物控制)之研究(不再是追求環境因子或像加熱、通風與 CO_2 供應等作動器之控制)。
5. 利用海洋深層水冷度的“低冷農業技術”。
6. 地對空氣熱交換器系統之應用研究。
7. 研究溫室設計、不同形狀溫室微氣候變化與驅動自然通風相關物理過程，以預測溫室中空氣交換率而達最佳環境控制。
8. 研究浮力與風驅動之通風如何受通風器構造、溫室尺寸與幾何等影響。
9. 理解與預測溫室內光分佈樣式之研究。
10. 研發考慮覆蓋特性、通風與作物蒸散的綜合電腦模式，以描述並掌控溫室的微氣候。
11. 開發適合潮濕熱帶與亞熱帶氣候之降溫系統。
12. 發展熱帶與亞熱帶自動化溫室，並提升自動化控制程度。

(二) 政策方面

儘管碳稅與 CO_2 排放權似乎離我們仍遠，但如果有一天「碳稅」成為事實，我們準備好了嗎？由荷蘭「綠標溫室」的方法中學到的概念(Nederhoff,

2004)或許對我們也有很大助益，下列概念可考慮納入未來之節能政策規劃：

1. 國內溫室農業與能源耗用之基本資料亟待建立。
2. 節能目標在於提升能源效率而非減低能源消耗：整個產業之能源消耗並非可感知的指標，因為隨著年度過往產業可能成長或縮減，因此能源評量選項可與面積有關而以 $MJ/m^2/year$ 表示，而且其與產量($kg/m^2/year$)相較也有意義，更好的是考慮能源與產量之比值，亦即能源效率，以 MJ/kg 或 kg/MJ 表示。
3. 進行資料記錄與基準評量(benchmarking)是有利產業發展的：產業可能想要示範能源使用(或能源效率)之改善，這需要資料，而改善只能以比較現有資料與之前資料而展現，因此產業現在必須開始記錄能源與生產之資料，並用作未來之基準(benchmark)，這當中使用標準化方法與準備好可用基本資料是重要的。
4. 考量推動獎勵制度：當最後有獎勵時人們總是較容易受激勵而奮鬥，過去這些年來荷蘭政府已實施許多嚴厲法律，通常伴隨稅金之獎勵，這些乃因為達成目標而獲得之獎勵，而牽涉獎勵方案之金錢通常來自同一產業之徵收(levies)與稅金，其結果是產業整體進步，而且產業目標也達成。

七、 結　語

當世界各國正努力降低碳排放與全球暖化時，降低能源消耗變成必然趨勢。在高緯度國家溫室控制燃料消耗的主要部分在於加熱，以便控制溫度和濕度，而在台灣溫室降溫反成為主要訴求。本文主要目的在於綜合回顧世界上主要可得溫室節能技術與系統研發，並且討論其代表性應用，除提供溫室節能的基本、技術、政策與節能措施等供參考外，並導引出值得國內深入研發與發展的可能缺口。可以歸結的是目前並無十全十美的可得技術，可符合溫室與內部作物所有節能需求。系統的選擇與操作係基於像氣候類型、種植作物、花費、維修、操作容易性、系統可靠性、系統壽命等各種參數。因此，溫室節能最適合技術應該可以符合種植者大部分需求狀況，並且在沒有增加能源使用下增加作物產出以取得最大回收。

參考文獻

1. 陳昌岑。2010。農業生產運用高效節能科技趨勢論壇紀實 (下)。臺灣花卉園藝。270: 32-34。
2. Adams, S.R., Woodward, G.C. and Valdes, V.M. 2002. The effects of leaf

removal and of modifying temperature set-points with solar radiation on tomato. J. Hort. Sci. Biotech. 77:733-738.
3. Agririou, A., Santamouris, M., Asimakopoulos, D.N., 1996. In: James and James, (Eds.), Ground Passive Cooling in Buildings, London, pp. 360–393.
4. Andel, N. van, E. van Andel, A. Ter Beek, E. Wortmann, J. Kristinsson, A. Mels, G. Zwwman, J. de Wilt and P. Oei. 2007. Greenhouse village, the greenhouse-powered neighborhood. Flyer of Innovation Network, Reinventing Agribusiness and Rural Areas, Ministry of Agriculture and Environment, The Netherlands.
5. Bailey, B.J. 1985. Wind dependent control of greenhouse temperature. Acta Hort. 174:381-386.
6. Bakker, J. C., 2009. Energy saving greenhouses. Chronica Horticulturae 49(2): 19-23.
7. Bot, G., N. van de Braak, H. Challa, S. Hemming, Th. Rieswijk, G.v. Straten and I. Verlodt. 2005. The solar greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply. Acta Hort. 691: 501-508.
8. Buchholz, M., P. Jochum and G. Zaragoza. 2005. Concept for water, heat and food supply from a closed greenhouse. The WATERGY project. Acta Hort. 691: 509-516.
9. Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2002. Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. Biosyst. Eng. 82(2):177-185.
10. Challa, H. and van de Vooren, J. 1980. A strategy for climate control in greenhouses in early winter production. Acta Hort. 106:159-164.
11. Dieleman, A. and Kempkes, F. 2006. Energy screens in tomato: Determining the optimal opening strategy. Acta Hort. 718:599-606.
12. Djevic, Milan and Aleksandra Dimitrijevic. 2004. Greenhouse Energy Consumption and Energy Efficiency. Conference Proceedings of Energy Efficiency. http://www.ru.acad.bg/baer/BugGHRad.pdf.
13. Enoch, H. Z. 1977. A theory for optimalization of primary production in protected cultivation, I Influence of aerial environment upon primary plant production, Symposium on More Profitable use of Energy in Protected Cultivation, Sweden.
14. Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., 2006. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. Energy Conversion and Management 47 (13–14), 1779–1798.
15. Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., Sirivastava, N.S.L., 2004. Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. Energy and Buildings 36 (3), 221–227.

16. Hemming, S., Kempkes, F., Van der Braak, N., Dueck, T. and Marissen, N. 2006. Filtering natural light at the greenhouse covering – Better greenhouse climate and higher production by filtering out NIR? Acta Hort. 711:411-416.
17. Korner, O. 2003. Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation. PhD Thesis, Wageningen Univ., The Netherlands.
18. Kumar, K.S., K.N. Tiwari, M. K. Jha. 2009. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. Energy and Buildings, 41: 1269–1275.
19. Kumar, R., Ramesh, S., Kaushik, S.C., 2003. Performance evaluation and energy conservation potential of earth–air–tunnel system coupled with non-air-conditioned building. Building and Environment 38 (6), 807–813.
20. Levit, H.J., Gaspar, R., Piacentini, R.D., 1989. Simulation of greenhouse microclimate by earth-tube-heat-exchangers. Agriculture and Forest Meteorology 47, 31–47.
21. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., Papanikolaou, N., 1994. Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers. Applied Energy 48 (1), 19–32.
22. Nederhoff, E. 2004. 'Green label greenhouse' and energy-saving policies in the Netherlands. Grower 59(10): 38-40.
23. Nederhoff, E. 2005. The costs of carbon tax for greenhouse growers. Grower 60(7): 37-38.
24. Nederhoff, E. 2006. Energy tax and CO_2 emission rights in the Netherlands. Grower 61(2): 36-38.
25. Nederhoff, E. & B. Houter. 2006. Potential energy saving measures categorised. Grower 61(5): 35-36.
26. Opdam, J.J.G., Schoonderbeek, G.G., Heller, E.B.M. and de Gelder, A. 2005. Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. Acta Hort. 691:517-524.
27. Pereira, G. P. 2002. Haiti waiting for its deep ocean water systems or "fountains of paradise." Tenth PACON International Congress on marine science and technology. Chiba, Japan.
28. Rorabaugh, P., M. Jensen, and G. Giacomelli. 2002. Greenhouse energy conservation and alternatives. University of Arizona. Reprinted from Chapter 13 in: Introduction to Controlled Environment Agriculture and Hydroponics.
29. Santamouris, M., Balaras, C.A., Dascalaki, E., Vallindras, M., 1994. Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. Solar Energy 53 (5), 411–426.

30. Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C.A., Argiriou, A., Asimakopoulos, D., Vallindras, M., 1995a. On the performance of buildings coupled with earth-to-air-heat-exchangers. Solar Energy 54, 375–380.
31. Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C.A., Argiriou, A., Asimakopoulos, D., Vallindras, M., 1995b. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses. Solar Energy 55 (2), 111–124.
32. Schiller, G., 1992. Earth tubes for passive cooling, the development of a transient numerical model for predicting the performance of earth/air heat exchangers. M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA.
33. Sethi, V.P. and S.K.Sharma. 2007a. Experimental and economic study of a greenhouse thermal control system using aquifer water. Energy Conversion and Management 48 (1), 306–319.
34. Sethi, V.P. and S.K.Sharma. 2007b. Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system. Solar Energy Journal 81 (6), 723–741.
35. Sethi, V.P. and S.K. Sharma. 2007c. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Solar Energy 81: 1447–1459.
36. Sonneveld, P.J. and G.L.A.M. Swinkels. 2005. New Developments of Energy-saving Greenhouses with a High Light Transmittance. Acta Hort. 691:589-596.
37. Sonneveld, P.J., Swinkels, G.L.A.M., Kempkes, F., Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2006. Greenhouse with integrated NIR filter and a solar cooling system. Acta Hort. 719:123-130.
38. Speetjens, S.L., T. van der Walle, G. van Straten, J.D. Stigter, H.J.J. Janssen, Th.H. Gieling. 2005. WATERGY, towards a closed greenhouse in semi-arid regions: experiment with a heat exchanger, Acta Hort. 691: 845 - 852.