

國立臺東大學
執行教育部111年度高等教育深耕計畫
2022綠色國際大學跨域學習線上成果發表工作坊

綠色大學專題創作成果報告書
(轉化類型：永續與生態友善農業)

議題：
A-2 CFD 模擬溫室灑水系統

主持人：朱力民 教授

學生：劉涵文 (11001606)

中華民國 111 年 6 月

摘要

本報告利用計算流體力學(CFD)方法、多物種模型(Species transfer)與離散相模型(Discrete Phase Model)模擬日式玻璃溫室空氣具水蒸氣之混合流體運動及溫室噴霧的粒子運動，模擬分析可得到溫室之壓力分佈、溫度分布、流速分布和濕度分布。本研究以國立臺東專科學校-園藝暨景觀科日式玻璃溫室為實驗場域，以現代物聯網技術取得溫室內的即時溫度及相對濕度並與模擬結果進行比較。

溫室實際狀態主要藉由風扇控制抽風流率使氣流透過水簾牆進入溫室，並開啟灑水系統以進行噴灑作業，模擬參數主要以改變灑水噴頭位置、高度、間距設計出六種模型進行暫態模擬分析。

本研究透過模擬分析，以最快達到溫室平均溫度及平均濕度的時間為目標值，統整出影響條件順序為灑水點數量、灑水點高度、噴灑點間隔距，但還是以實際溫室應用為考量。

關鍵字：溫室、流體力學計算、離散相模型、噴霧、物聯網、通風系統

目 錄

摘要	i
目錄	ii
圖目錄	iii
表目錄	v
符號說明	vi
一、緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 溫室種類	1
1.3 文獻回顧	3
1.4 研究目的	5
二、理論分析	7
2.1 統御方程式	7
2.2 Realizable k- ϵ 湍流模型.....	7
2.3 離散項模型.....	8
2.4 熱輻射模型.....	11
三、研究方法	13
3.1 計算流體力學(CFD).....	13
3.2 溫室實驗場實驗	19
四、結果與討論	22
4.1 流場分析	22
4.2 結果分析	27
五、結論與未來展望.....	29
5.1 結論	29
5.2 未來展望	29
參考文獻.....	30

圖目錄

圖1.1 結構型溫室	2
圖1.2 簡易型溫室	3
圖1.3 網室型溫室	3
圖2.1 粒子運動模型	10
圖3.1 CFD求解步驟	13
圖3.2 溫室幾何外形	14
圖3.3 溫室流場剖面圖	14
圖3.4 六面體網格	15
圖3.5 四面體網格	15
圖3.6 溫室管壓錶頭	16
圖3.7 TP725春井抽水機性能曲線(春井企業股份有限公司)	16
圖3.8 進出口區命名(溫室)	17
圖3.9 旋轉流體區命名(負壓風扇).....	17
圖3.10 溫室灑水點俯視配置圖.....	19
圖3.11日式玻璃溫室建築-東專園藝科	19
圖3.12 主控器	20
圖3.13電磁閥開關	20
圖3.14 物聯網系統架構.....	20
圖3.15 即時溫室狀態網站.....	21
圖4.1 溫室基本系統區域定義	22
圖4.2 模型一YZ面溫度分布圖.....	23
圖4.3 模型一YZ面比濕分布圖.....	23
圖4.4 模型二YZ面溫度分布圖.....	24
圖4.5 模型二YZ面比濕分布圖.....	24
圖4.6 模型三YZ面溫度分布圖.....	25
圖4.7 模型三YZ面比濕分布圖.....	25

圖4.8 模型四YZ面溫度分布圖.....	26
圖4.9 模型四YZ面比濕分布圖.....	26
圖4.10 模擬數據擷取縣.....	27
圖4.11 溫室內流場平均溫度隨時間變化.....	28
圖4.12 溫室內流場平均相對濕度隨時間變化.....	28

表目錄

表3.1 噴灑模型係數	15
表3.2 (邊界條件式定)Boundary Conditions	18

符號說明

ρ	平均流體密度
u_i	平均流體速度
μ	流體分子動力黏滯係數
μ_t	紊流黏滯係數
P	平均壓力
S_i	因葉片間流道對風扇中心旋轉產生的原 項
k	湍流動能
ε	運輸方程式
G_k	層流速度梯度產生的動能項
G_b	浮力產生的動能項
YM	可壓縮流動中湧動
η	流體黏度
S	表面積
m_p	粒子質量
\vec{u}	流體速度向量
ρ_p	粒子的密度
\vec{F}	粒子附加力
τ_r	液滴或粒子的反應時間
Ω	粒子角速度
T	流體的絕對溫度
$D_{T,p}$	熱泳係數
$S_{n,ij}$	頻譜強度
δ_{ij}	克羅內克 δ 函數
ν	運動粘度
C_c	<u>Cunningham</u> 校正
ζ_i	零均值

d_{ij}	變形張量
C_{RL}	旋轉升力係數
A_p	粒子表面積
\vec{V}	相對流體的粒子速度向量
$\vec{\Omega}$	相對流體粒子角速度向量
S	定義旋轉參數
I_p	粒子轉動慣量
$\vec{\omega}_p$	粒子角速度向量
ρ_f	流體密度
d_p	粒子直徑
C_ω	旋轉阻力係數
\vec{T}	流體域中施加到粒子的扭矩
\vec{r}	位置向量
\vec{S}	方向向量
\vec{S}'	散射方向向量
s	路徑長度
a	吸收係數
n	折射率
σ_S	散射係數
σ	Stefan-Boltzmann常數
I	輻射強度
Φ	相位函數
λ	波長
a_λ	光譜吸收係數
$I_{b\lambda}$	普朗克函數給出的黑體強度

一、緒論

1.1 研究動機

全球暖化是人類當前無法避免的問題，2019年IPCC發布的《氣候變遷與土地報告》指出1981至2010年，「全球玉米、小麥和大豆的平均產量在氣候變遷的影響下，已經分別減少了4.1%、1.8%和4.5%」。

暖化造成的氣候變遷已開始造成各國的糧食危機，根據中央氣象局資料2019年是有紀錄以來最暖的一年，造成許多植物生長節奏受到影響。例如：花卉作物，有研究顯示：

花卉作物易受降雨、強風、不當溫度等氣候因素的影響，導致品質受損、影響商品外觀，因此花卉生產對於溫、網室等栽培設施的需求較為殷切。

台灣發展農業溫室已歷經30餘年，初期以學術研究為主，發展至今已廣泛普及於花卉及蔬果的作物。根據調查2002年「蝴蝶蘭溫室面積為229,457坪，育苗場溫室面積為59,634坪」，主要以蝴蝶蘭和育苗業設置面積較多。目前大多溫室設計實驗，皆須以實際建造溫室進行實驗，且經常無法得到理想之狀況，耗費大量資金與人力，研發成本過高。過去有相關溫室CFD模擬計算，只能得到溫室內部溫度分布，對於溫室設計上的參考有限，溫室設計上還需考慮溫室建築的地理位置及溫室內部的水牆、噴霧和排風等問題，若能運用CFD模擬計算去評估上述問題，對溫室的發展前程不可限量。

1.2 溫室種類

溫室為一種植物栽培的建築物，依建築強度種類可分為三種結構型溫室、簡易型溫室與網室型。

1. 結構型:結構型以玻璃、玻璃浪板或塑膠布溫室為主。主要應用於研究、蘭花及種苗之生產。
2. 簡易型:簡易型均以塑膠布為覆蓋，有些則以帆布為遮蔭，平時採開放天空之方式，主要以種植蔬菜、瓜類為主。
3. 網室型:網室型採用之紗網顏色則有綠、黑、白及藍等，可以調整不同之波長，以適應不同蔬菜之生長。

一、目前國內所使用的溫室依型號編碼分類如下：

依其屋頂之幾何形狀，分成下列W、V、U、S等系列型態：

(一)W系列：Venlo型溫室，柱間具2~3個屋頂單位，採用較細構材採光良好，簷高較高減少夏季的高溫障害，適合大規模栽培。

(二)V系列：大跨距山形溫室，屋頂左右對稱，受光量均一通氣性良好，單棟溫室常採用。

(三)U系列：圓屋頂溫室，屋頂構材由鋁管組成，覆蓋塑膠布，簡便且造價便宜，為目前國內較常使用的形式。

(四)S系列：單斜頂屋頂溫室，僅具單面之屋頂，另面為開放之通風口，利用煙突效應，充分發揮自然通風性能。

二、溫室構造以水平樑為主要形式，另有利用力霸樑取代，或於樑柱間加裝斜撐，以加強結構者分別以T、B表示。

T：力霸樑

B：樑柱斜撐

三、依據溫室外表被覆材料的材質，分別以G、C、B表示。

G：玻璃

C：硬質塑膠，包括PET、FETE等

P：塑膠布，包括EVA、PE、PEP、PO及其他機能性軟質塑膠布等。



圖1.1 結構型溫室



圖1.2 簡易型溫室



圖1.3 網室型溫室

1.3 文獻回顧

早期溫室研究大部分是以實際建造並進行實驗為主，透過測量流體區的變化進行分析，以此分析溫室的效能，若須進行溫室改良，便需要重新設計建造，成本相當高。至今，隨著電腦運算處理速度大幅度的提升，計算流體力學軟體(CFD)隨之崛起，從過去簡單3D結構分析，到現在已經可以針對實際大型非結構之流體區域進行分析。如此透過計算流體力學軟體便能依照需求分析各種溫室及溫室內部設計，若須變更設計只需透過CAD軟體進行幾何修改及變更邊界參數設計及可。流場分析應用廣泛，過去相關流場分析研究，廠房的流場分析研究相對於溫室較為成熟。

1.3.1 廠房相關研究文獻

(顏銘志, 2000)分析高科技半導體製程中超潔淨無塵室，設計了一種垂直氣流控制方法用於無塵室與外在環境間的緩衝區，利用Fluent軟體進行分析，該數值模擬可用於微環境之流場分析與微粒子的預測。

(魏嘉言, 2001)利用數值模擬分析無塵室廠房，模擬結果可找出微塵粒子分布可能，提出可藉由消除機台突出尖角，來消除機台熱源引發的熱對流渦旋。

(江文琪, 2005)利用Fluent暫態分析真實物體運動狀態對於流場之影響，物體運動狀態使用動態網格去建立，無塵室對於氣流分布必須均勻，透過模擬分析可作為無塵室建造設計改良前的一個參考。

(黃淳鴻, 2006)利用Fluent分析無人搬運車(AGV)行駛於無塵室內產生氣流的分布狀況，經由分析得知AGV在移動中會產生負壓區域造成渦旋氣流導致AGV後方容易產生微粒子沉積，需時常對於此區域進行清理，提高產品之良率。

(黃鈺純, 2006)針對雙層屋頂搭配太子樓構造以CFD模擬自然通風及降溫效果分析，使用雙層屋頂屋脊口開啟可以增換氣量比脊口關閉時增加14.9倍；高低窗通風效果較於開一般窗增加1.5倍。

(陳宏源, 2007)利用STAR-CD進行模擬分析機械加工廠內部流場的通風排汙問題，找出最佳的通風比例，在建議的通風配置下，廠房內部總體汙染濃度可下降4%，但殘留汙染濃度為14%，仍可以繼續努力。

(周士傑, 2010)利用Fluent分析垂直層流式光罩盒儲存櫃，對於內部流場進行排除汙染物的流場分析，以三種不同相對移動速度來模擬真實狀況之內部氣流影響，結果顯示風機風量越大、光罩擺滿、光罩對稱擺放及無人搬運車(AGV)行駛速度越慢，以上都是可參考的改善方案。

(吳承軒, 2015)利用COMSOL MULTIPHYSICS模擬設計分析，找出在能源消耗下合適的系統設計，增加產品良率，更可減少設計時間與成本，廠房設計上更佳便利。

(吳育致, 2015)利用COMSOL MULTIPHYSICS模擬分析，找出廠房熱氣滯留區域並設計排氣系統；在不影響到廠房整體配置下，設計出多種結構如：「間隔魚翅結構、單排魚翅結構、雙排魚翅結構、加寬太子樓結構、原始設計加風溝結構」，對此進行分析其優缺點。

1.3.2 溫室相關研究文獻

(方煒, 1994)探討水簾牆的降溫效率分析，提出水簾牆尺寸大小及安裝一體性對於降溫影響，設計降溫系統時，水簾牆、風機與控制等設計時要綜合考量。

(方煒, 1995)推導出水牆系統降溫極限公式及適用性評估；推導出噴霧系統理論降溫極限公式，提出任何噴霧系統都應考量溫度最高實的噴水流量極限值，避免噴水

過量。

(Arbel, Yekutieli, & Barak, 1999)提出了一種溫室蒸發冷卻系統，該系統噴霧基於非常細的水滴，灑水時不會弄濕葉子。實驗結果得到的通風和蒸發流量與數學模型得到的結果一致。在相同條件下，該噴霧系統提供比風扇系統更均勻的溫度和濕度條件。

(黃裕益, 1999)指出增加溫室內的氣流亂度，可提高蒸發冷卻之效應，藉由灑水頭設置點設計，可改善強制通風出入風口的溫度梯度。

(尤建琳, 2002)在防蟲網型溫室內架設擾流風扇進行試驗，證明可增加通風率，也可使噴霧霧粒傳播更遠。

(楊力東, 2005)利用CFD數值解析國小建築教室空間，針對建築物開口部與室內氣流環境進行流場分析並提出改善。

(秦銘志, 2006)以CFD數值模擬溫室，使用太陽熱輻射模型與設置水牆，提出以CFD模擬分析提升以實驗為主的溫室研究，節省建設與設計成本。

(張延璋, 2011)將WSN應用於一座立體式栽培的植物工廠，將感測器蒐集到的資料回傳至資料庫，便可在後端管理監控平台得到環境參數的資料。

(簡君良, 2011)將物聯網應用於植物工廠的灌溉與監測，除了可監測環境參數之外，管理者可以在網頁上的人機介面系統對控制策略及各項設定值做修改，即可達到同步作業，此系統使植物工廠的管理更為方便。

(陳柔臻, 2014)提出一個具有植物結構模型的植物工廠模型，使用FLUENT 模擬軟體進行模擬，採用SIMPLE方法搭配控制體積法求解，其流場範圍設定在層架中的其中一層，分析風扇在不同位置的流場。

(張昭玲, 2016)利用CFD搭配COMSOL MULTIPHYSICS 數值模擬軟體進行環境建模，以層架上的燈管做為熱源配合通風風扇進行流場分析，得到距離入風口躍進層架溫度分布較為均勻，較遠者反之，此模型可分析流場的溫度與濕度。

(邱煒勛, 2017)考慮風速對於植物光合作用的影響，使用ANSYS FLUENT 進行流場計算，以四種不同風扇擺設位置進行模擬分析，加入二氧化碳進行二氧化碳濃度分布分析。

上述文獻研究尚未進行暫態灑水之溫溼度引響之流場分析。

1.4 研究目的

目前大多溫室實驗，皆須以實際建造溫室進行實驗，且經常無法得到理想之狀況，耗費大量資金與人力，研發成本過高。過去有相關溫室CFD模擬計算，但只能得到溫室內部溫度分布，對於溫室設計上的參考有限。

本研究欲提出利用計算流體力學方法模擬日式玻璃溫室，使用 (Species transfer)多物種模型與 (Discrete Phase Model)離散相模型，在空氣中加入水蒸氣，考慮相對溼度，模擬溫室噴霧的粒子運動狀態，並以國立臺東專科學校-園藝暨

景觀科 日式玻璃溫室的實際狀況為考量，結合現代物聯網技術取得即時溫濕度變化，透過水牆、灑水和風扇控制，與模擬情況進行比較，使未來在溫室改良時，提供更多的參考依據。

二、理論分析

2.1 統御方程式

本研究採用之數學模式為三維可壓縮湍流(Realizable k-epsilon湍流模型)來模擬流場並做下列假設：

1. 不可壓縮穩定流場
2. 流體為牛頓流體
3. 暫態流場分析
4. 考慮重力場(常數 9.81 m/s²)
5. 考慮離散相蒸發模型
6. 考慮熱輻射模型

此外流場必須符合質量守恆與動量守恆，亦即滿足下列的連續方程式(Continuity equation)及奈維爾-史托克方程式(Navier-Stokes equation)。

流體控制方程連續方程式：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0, \quad (2-1)$$

動量守恆方程式：

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i, \quad (2-2)$$

其中

ρ ：平均流體密度

u_i ：平均流體速度

μ ：流體分子動力黏滯係數(molecular dynamic viscosity)

μ_t ：紊流黏滯係數(turbulent viscosity)

P ：平均壓力

S_i ：因葉片間流道對風扇中心旋轉產生的原項(source term)

2.2 Realizable k-ε 湍流模型

(Launder & Spalding, 1983) 提出標準k-ε湍流模型，在熱交換流場模擬分析中應用相當廣泛。k-ε湍流模型為半經驗公式，從實驗中發生的現象總結而成，標準k-ε 湍流模型，主要是基於湍流的動能與擴散率，k是精確的方程式，ε是經驗公式推導的方程式，本研究使用Realizable k-ε 湍流模型，是相對較新的一種k-ε 湍流模型，湍流動能k與耗散ε運輸方程式如式(3.1)和式(3.2)，

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} c_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2-4)$$

其中 $C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$ 。

方程式中 G_k 與 G_b 分別代表層流速度梯度產生的動能項和浮力產生的動能項， Y_M 代表在可壓縮流動中湧動，比起標準 $k-\varepsilon$ 湍流模型有兩個主要的不同，一個增加了一種帶旋流修正的湍流黏性的公式。

2.3 離散相模型

2.3.1 粒子力平衡

ANSYS Fluent 通過積分顆粒上的力平衡來預測離散相顆粒（或液滴或氣泡）的軌跡，該力平衡寫在拉格朗日參考系中。這種力平衡使粒子慣性等於作用在粒子上的力圖 2.1，可以寫成

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (2-5)$$

其中， m_p 是粒子質量， \vec{u} 是流體速度向量， \vec{u}_p 是粒子速度， ρ 是流體密度， ρ_p 是粒子的密度， \vec{F} 是粒子附加力， $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ 是阻力， τ_r 是液滴或粒子的反應時間依據 (Gordon, 1968) 計算：

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (2-6)$$

此處， μ 是流體分子動力黏滯係數， d_p 是粒徑， Re 是相對雷諾數，其定義為

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (2-7)$$

公式 (2-5) 包含了作用在粒子上的重力，可在在 ANSYS Fluent 中定義重力矢量的大小和方向。

公式 (2-5) 在質點力平衡中包含了附加力 (\vec{F})，這在特殊情況下可能很重要。其中第一個是“虛擬質量”力，該力是加速圍繞粒子的流體所需的力。這種力量可以寫成

$$\vec{F} = C_{vm} m_p \frac{\rho}{\rho_p} \left(\vec{u}_p \nabla \vec{u} - \frac{d\vec{u}_p}{dt} \right) \quad (2-8)$$

其中 C_{vm} 的虛擬質量因子的默認值為 0.5。由於流體中的壓力梯度會產生附加力：

$$\vec{F} = m_p \frac{\rho}{\rho_p} \vec{u} \nabla \vec{u} \quad (2-9)$$

當流體的密度遠低於顆粒的密度時，虛擬質量和壓力梯度力並不重要，就像氣體流中的液體與固體顆粒一樣， $\rho/\rho_p \ll 1$ 。對於接近單位的值，虛擬質量和壓力梯度力會變得很大，當密度比大於0.1時將其包括在內。

在公式(2-5)還包括上出現的由於參考幀的旋轉顆粒的力。在移動參考框架中對流建模時會產生這些力，例如，對於繞軸定義的旋轉，可以將笛卡爾和方向上作用在粒子上的力寫為：

$$m_p \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \Omega^2 x + 2m_p \Omega \left(u_{p,y} - \frac{\rho}{\rho_p} u_y\right) \quad (2-10)$$

其中 $u_{p,y}$ 和 u_y 是笛卡爾 y 方向上的粒子和流體速度， Ω 是粒子轉速，並且

$$m_p \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) \Omega^2 x + 2m_p \Omega \left(u_{p,y} - \frac{\rho}{\rho_p} u_y\right) \quad (2-11)$$

其中 $u_{p,x}$ 和 u_x 是笛卡爾 x 方向上的粒子流體速度和粒子速度。

懸浮在具有溫度梯度的氣體中的小顆粒將承受與梯度方向相反的力。這種現象稱為熱泳。在公式 (2-5)中，ANSYS Fluent可以選擇在附加力中包括對粒子的熱泳效應：

$$\vec{F} = -D_{T,p} \frac{1}{T} \nabla T \quad (2-12)$$

$D_{T,p}$ 為熱泳係數。可以將係數定義為常數，多項式或用戶定義的函數，也可以使用 (Steele, Malte, Nicol, & Kramlich, 1995)建議的形式：

$$D_{T,p} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (K + C_t Kn)}{\rho (1 + 3C_m Kn) (1 + 2K + 2C_t Kn)} \quad (2-13)$$

對於亞微米顆粒，布朗運動的影響可以可選地包含在附加力項中。布朗力的分量被建模為高斯白噪過程，其頻譜強度 $S_{n,ij}$ 由 (Leonard & Mokhtari, 1990) 給出：

$$S_{n,ij} = S_0 \delta_{ij} \quad (2-14)$$

δ_{ij} 是克羅內克 δ 函數

$$S_0 = \frac{216\nu k_B T}{\pi^2 \rho d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^2 C_c} \quad (2-15)$$

T 是流體的絕對溫度， ν 是運動粘度， C_c 是Cunningham校正， k_B 是玻耳茲曼常數。布朗力分量的振幅形式為

$$F_{b_i} = m_p \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} \quad (2-16)$$

其中 ζ_i 是零均值，單位方差無關的高斯隨機數。在每個時間步長評估布朗力分量的幅度。為了使布朗力生效，必須啟用能量方程式。布朗力僅用於層流模擬。

Saffman升力或由剪切而產生的升力可以包括在內附加力項。Saffman升力使用 (Rhie & Chow, 1983)提供的表達式：

$$\vec{F} = m_p \frac{2Kv^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk}d_{kl})^{1/4}} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (2-17)$$

其中 $K = 2.594$ 和 d_{ij} 是變形張量。這種形式的提升力適用於雷諾數較小的顆粒，僅建議用於亞微米顆粒。

當粒子在流體中旋轉時，會產生馬格努斯力或旋轉升力。升力是由沿顆粒表面的壓差引起的。馬格努斯力 F_{RL} 由旋轉升力係數 C_{RL} 表示為：

$$F_{RL} = \frac{1}{2} A_p C_{RL} \rho_f \frac{|\vec{V}|}{|\vec{\Omega}|} (\vec{V} \times \vec{\Omega}) \quad (2-18)$$

A_p 為粒子表面積， \vec{V} 為相對流體的粒子速度向量， $\vec{\Omega}$ 相對流體粒子角速度向量。對於旋轉升力係數 C_{RL} ，文獻中提供了不同的方法。(Nguyen, Vervisch, Subramanian, & Domingo, 2010) 提出旋轉升力係數 C_{RL} ，取決於旋轉雷諾數 Re_ω 和粒子雷諾數 Re_p ：

$$C_{RL} = 0.45 + \left(\frac{Re_\omega}{Re_p} - 0.45 \right) \exp(-0.05684 Re_\omega^{0.4} Re_p^{0.3}) \quad (2-19)$$

$Re_p < 2000$ ，此公式與實驗吻合。

(Taylor & PJ, 1975) 提出旋轉升力係數 C_{RL} 定義為自旋參數的函數， S 如下所示：

$$\begin{aligned} C_{RL} &= 0.4 & \text{for } S \geq 1 \\ C_{RL} &= (0.4 \pm 0.1)S & \text{for } S < 1 \end{aligned} \quad (2-20)$$

旋轉參數 S 定義為：

$$S = \frac{|\vec{\omega}_p| d_p}{2|\vec{u}_f - \vec{u}_p|} \quad (2-21)$$

2.3.2 粒子扭矩平衡

粒子旋轉是粒子運動的自然組成部分，會對粒子在流體中運動的軌跡產生重大影響。對於具有高慣性矩的大顆粒或重顆粒，衝擊甚至更明顯。在這種情況下，如果在模擬研究中不考慮粒子旋轉，則生成的粒子軌跡可能與實際粒子路徑明顯不同。為了解決粒子旋轉問題，需要為粒子的角動量求解一個附加的常微分方程 (ODE)：

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \cdot \vec{\Omega} = \vec{T} \quad (2-22)$$

I_p 粒子轉動慣量， $\vec{\omega}_p$ 是粒子角速度向量， ρ_f 是流體密度， d_p 是粒子直徑， C_ω 是旋轉阻力係數， \vec{T} 是在流體域中施加到粒子的扭矩， $\vec{\Omega}$ 是相對粒子流體角速度向量計算依據：

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u}_f - \vec{\omega}_p$$

對於球形粒子，慣性矩 I_p 的計算公式為：

$$I_p = \frac{\pi}{60} \rho_p d_p^5$$

從公式 (2-8)可以明顯看出，扭矩 \vec{T} 是由粒子慣性和阻力之間的平衡引起的。

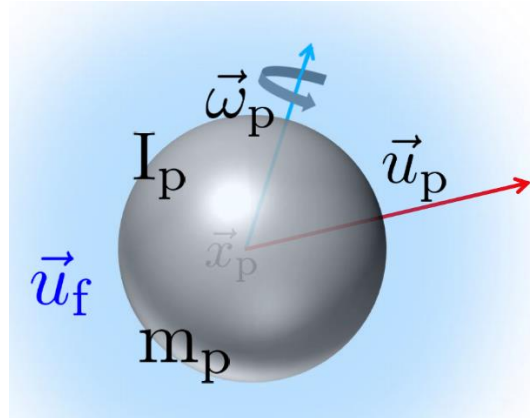


圖 2.1 粒子運動模型

2.4 熱輻射模型

ANSYS Fluent提供了一個太陽能負載模型，可用於計算進入溫室內流場區域的太陽光線的輻射效應。太陽射線追蹤方法是一種實用的方法，可以將太陽負荷作為能量方程式中的熱源。如果要使用太陽光線追蹤功能必須開啟DO模型來計算域內的輻射效果，太陽能負載模型中包括一個太陽方位計算器功能，可用於在給定的時間、日期和位置上計算出太陽在天空中的位置。太陽能負載僅在3D求解器中可用，並且可用於建模穩定和非穩定流。

2.4.1 輻射傳遞方程

輻射傳遞方程 (RTE) 用於吸收，發射和散射介質在位置 \vec{r} 的方向 \vec{s} 是：

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2-23)$$

\vec{r} = 位置向量

\vec{s} = 方向向量

\vec{s}' = 散射方向向量

s = 路徑長度

a = 吸收係數

n = 折射率

σ_s = 散射係數

σ = Stefan-Boltzmann常數 $5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$

I = 輻射強度，取決於位置 (\vec{r}) 和方向 (\vec{s})

T = 當地溫度

Φ = 相位函數

Ω' = 立體角

$(a + \sigma_s)s$ 是介質的不透明度。 n 在考慮半透明介質中的輻射時，折射率很重要。

2.4.2 DO模型方程式

DO模型將方向上的輻射傳遞方程 (RTE) \vec{s} 視為場方程，因此公式 (2-23) 改寫為

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an\frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')d\Omega' \quad (2-24)$$

ANSYS Fluent可使用gary模型對non-gary輻射進行建模，頻譜強度 $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ 可寫成：

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}')d\Omega' \quad (2-25)$$

λ 是波長， a_λ 是光譜吸收係數， $I_{b\lambda}$ 是普朗克函數給出的黑體強度。散射相位函數和折射率與波長無關。每單位立體角的波長帶中的黑體發射表示為：

$$[F(0 \rightarrow n\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T)]n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (2-26)$$

$F(0 \rightarrow n\lambda_2 T)$ 是黑體輻射是0到波長範圍內， λ 在溫度 T 和折射率 n 的條件下發出的輻射能強度。計算位置 $I(\vec{r}, \vec{s})$ 在每個方向 \vec{s} 上的總強度 \bar{r}

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s})\Delta\lambda_k \quad (2-27)$$

三、研究方法

3.1 計算流體力學(CFD)

CFD求解問題的方法分為三個步驟，前處理、求解流場和後處理分析圖3.1。

(1) 前處理

前處理為CFD最耗時的一個步驟，在求解流場前，需要先對原始模型進行修改或簡化，目的是為了在網格劃分階段，減少網格鋪設的奇點，網格數量需要在合理的範圍進行控制，過多的網格會造成大量計算上的負擔，影響到求解時間，過少的網格，無法模擬較詳細的流動，選取合適的網格還是要靠經驗累積以及多次嘗試。

(2) 求解流場

將模型網格化後帶入求解器(本研究採用Ansys Fluent)，首先檢查網格，將非結構性質的網格進行簡化，並確認好正確的尺寸，設置紊流模型種類、能量方程式、太陽輻射模型、多物種模型、離散相模型，設置流體的物理性質，例如：密度、黏性、溫度、比熱容等；設置邊界條件，給定合適的參考值進行初始化，最後選取求解時間步長和迭代次數進行計算。

(3) 後處理分析

後處理分析是將已收斂的流場更佳清晰的展示並對結果進行分析，本研究使用Ansys Fluent 內建後處理功能，可以進行流場動畫、曲線、向量圖和梯度圖等。

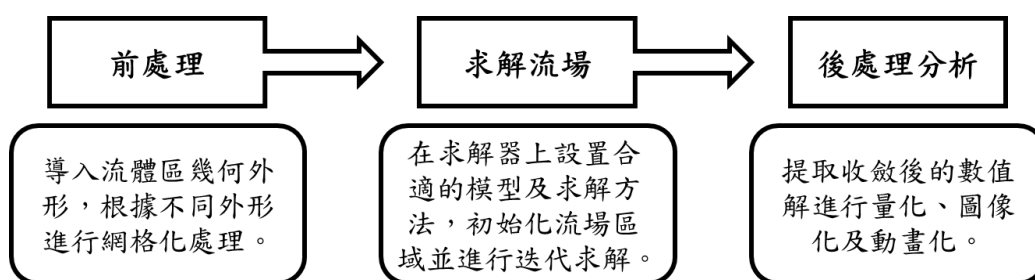


圖3.1 CFD求解步驟

3.1.1 幾何模型建立

本研究再進行CFD數值模擬前，首先使用SolidWork建立溫室基礎外形，在Ansys SpaceClaim進行溫室水簾牆、灑水頭和風扇的配置(如圖 3.2)，在處理幾何模型時，通常會將原圖進行修模處理，但本研究在繪製模型時，已考慮幾何破碎面的問題，故不需要再額外進行修模處理。

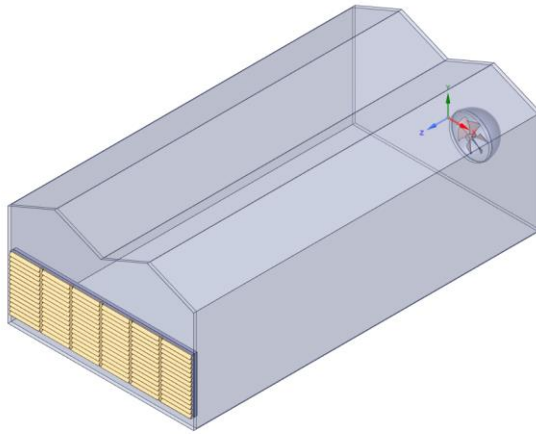


圖3.2 溫室幾何外形

本研究將擷取溫室內流場之容積與外流場之容積與分為四部分(圖3.3)，分別為溫室外部流場、水簾牆流體區、溫室內部流場與負壓風扇旋轉流體區。

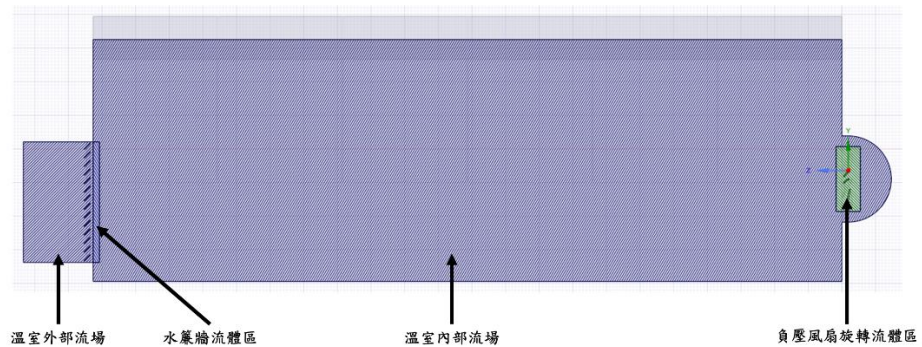


圖3.3 溫室流場剖面圖

3.1.2 Mesh網格建立

本研究使用Ansys Fleunt模組中內建Mesh來進行幾何流體區域網格建立，合理且高品質的網格是CFD計算的前提條件，在Ansys Fluent Mesh 中3D圖形建立網格主要分為以下兩種

(1) 六面體網格

六面體網格(圖3.4)屬於結構型網格，主要使用於結構圖形，網格品質較高，生成速度較慢，在壁面或邊界層處理上有很好的正交性。

(2) 四面體網格

四面體網格(圖3.5)屬於非結構型網格，主要使用於非結構圖形，網格品質較

低，生成速度較快，接近實體程度高。

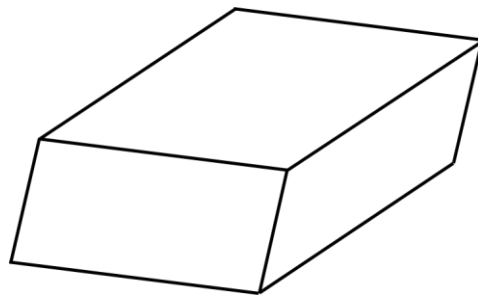


圖 3.4 六面體網格

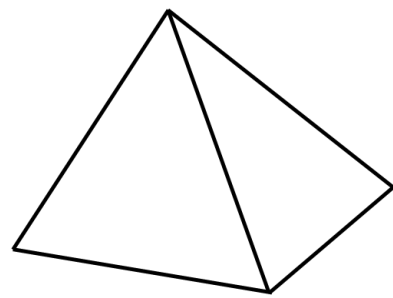


圖 3.5 四面體網格

3.1.3 CFD求解器設定

本研究使用暫態(trainisient)流場分析，考慮負壓風扇在設定轉速下隨時間對整體流場的影響分析；考慮太陽輻射對於溫室內流場影響分析；考慮離散相模型應用於灑水頭噴灑對於溫室之影響；考慮多物種模型對於溫室濕度之影響。求解器設定分別為設置求解模型、邊界條件設定、壓力求解器設定與初始化條件。

求解模型主要為以下三種

- (1) 紊流模型(Viscous)
- (2) 輻射模型(Radiation)
- (3) 離散相模型(Discrete Phase)

本研究不考慮以下五點：(1)熱浮力對粒子軌跡的影響。(2)布朗運動的影響、(3)Saffman升力、(4)粒子對於邊界牆的腐蝕和增厚作用。(5)粒子衰減和湍流渦導致數量改變之影響。噴灑模型參數如表 3.1，噴灑種類主要有Single、Group、Cone/Solid Cone (3D)、Atomizers和Surface等，本研究不考慮噴灑角度問題故將噴灑頭(俗稱香菇噴頭)簡化為一個正圓型噴灑面，故噴灑種類採用Surface，本研究考慮溫室噴灑狀態下濕度影響粒子種類選擇Droplet，Droplet考慮到加熱、蒸發和沸騰三種物理狀態，噴灑速度利用白努力定律推算，利用錶頭壓力圖3.6代入抽水馬達參數圖3.7可得到噴灑流量。

表 3.1 噴灑模型參數

Injection Type	Surface
Materail	Water-liquid
Particle Type	Droplet
Velocity (x,y,z)(m/s)	(0 ,-6.9 ,0)
Injection Diameter (m)	0.001
Temperature (°C)	15
Total Flow Rate (kg/s)	0.04



圖3.6 溫室管壓錶頭

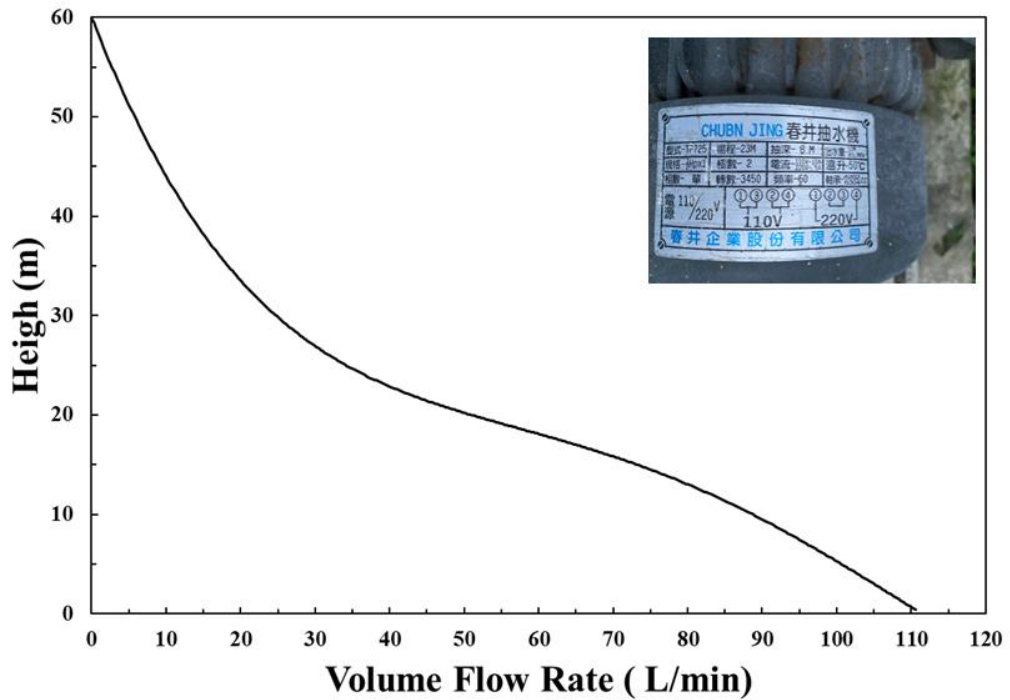


圖3.7 TP725春井抽水機性能曲線(春井企業股份有限公司)

3.1.4 邊界條件設定

模型建置完成後，首先在Ansys Fluent 材料(Material)中設置材料物性參數，本研究考慮多物種模型，故將流體材料中的空氣(air)與水蒸氣(water vapor)加入到混和流

體材料(mixture-template)作為主要流體材料，固體材料分別為玻璃、水泥地與鋁合金，玻璃參數密度： $2200 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、比熱容： 745 (j/kg-k) 、熱傳導係數： 1.38 (w/m-k) 與折射率： 1.55 ；水泥地參數密度： $2000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、比熱容： 970 (j/kg-k) 與熱傳導係數： 0.28 (w/m-k) ；鋁合金參數密度： $2719 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 、比熱容： 871 (j/kg-k) 與熱傳導係數： 202.4 (w/m-k) 。

進入Ansys Fluent 前會先在Ansys Mesh中進行邊界命名，如此可方便在Ansys Fluent進行邊界條件設定，流體進口區命名為inlet在Boundary Conditions設為velocity inlet；流體出口區命名為outlet在Boundary Conditions設為pressure outlet；負壓風扇區命名為fluid_rotor在Cell Zone Conditions設為Mesh Motion設定轉速(根據模擬需求設置，旋轉軸為+z軸方向)，風扇葉片命名為propeller在Boundary Conditions 設為Moving Wall(與fluid_rotor同步轉動)，如圖3.8、圖3.9，表3.2為邊界參數設置。

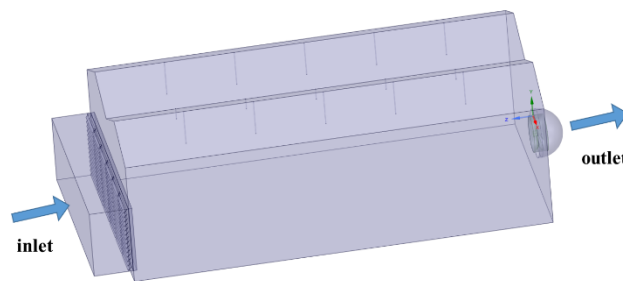


圖 3.8 進出口區命名(溫室)

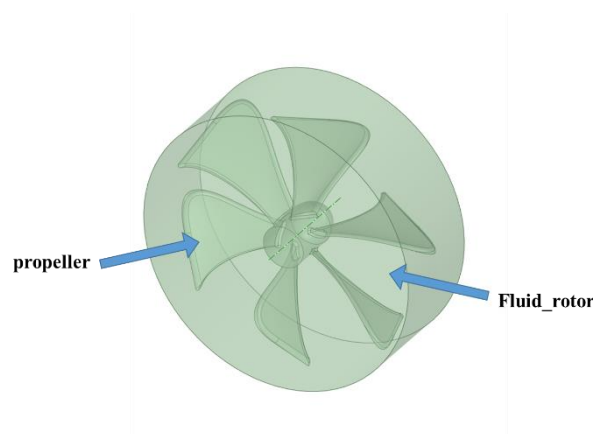
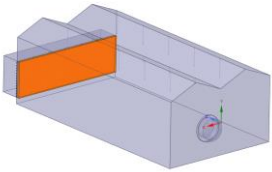
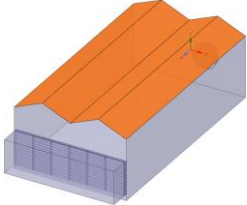
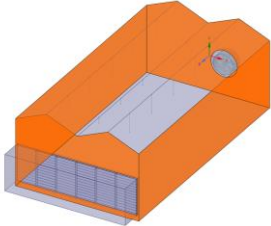
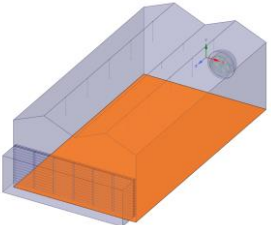
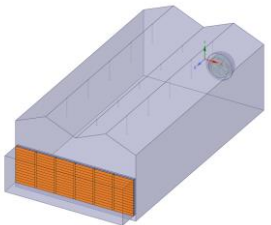


圖 3.9 旋轉流體區命名(負壓風扇)

表3.2 (邊界條件式定)Boundary Conditions

圖示	說明
	<p>水簾牆區命名為fluid_porous在Cell Zone Conditions設為Porous Zone和Laminar Zone，孔隙率設為0.7，參與熱輻射模型。</p>
	<p>溫室屋頂邊界命名為wall_roof在Boundary Conditions 材料為玻璃，參數設置1.Heat Transfer Coefficient：30 (w/m²-k) 2.Free Stream Temperature：21.4 (°C) 3.External Radiation Temperature：21.4 (°C) 4.Wall Thickness：0.08 (m)。</p>
	<p>溫室牆邊界命名為wall_side在Boundary Conditions材料為玻璃參設置1.Heat Transfer Coefficient：30 (w/m²-k) 2.Free Stream Temperature：21.4 (°C) 3.External Radiation Temperature：21.4 (°C) 4.Wall Thickness：0.08 (m)。</p>
	<p>溫室地面邊界命名為wall_gnd在Boundary Conditions材料為玻璃參設置1.Heat Transfer Coefficient：30 (w/m²-k) 2.Free Stream Temperature：21.4 (°C) 3.External Radiation Temperature：21.4 (°C) 4.Wall Thickness：0.08 (m)。</p>
	<p>溫室百葉簾邊界命名為Wall_blade在Boundary Conditions材料為鋁合金參設置1.Heat Transfer Coefficient：30 (w/m²-k) 2.Free Stream Temperature：21.4 (°C) 3.External Radiation Temperature：21.4 (°C) 4.Wall Thickness：0.01(m)。</p>

本研究將灑水噴灑面命名wall_water_injection，一共有15個噴灑點，如圖3.10紅色框分別為3個噴灑點、9個噴灑點和15個噴灑點示意圖，以此分組進行分析比較。

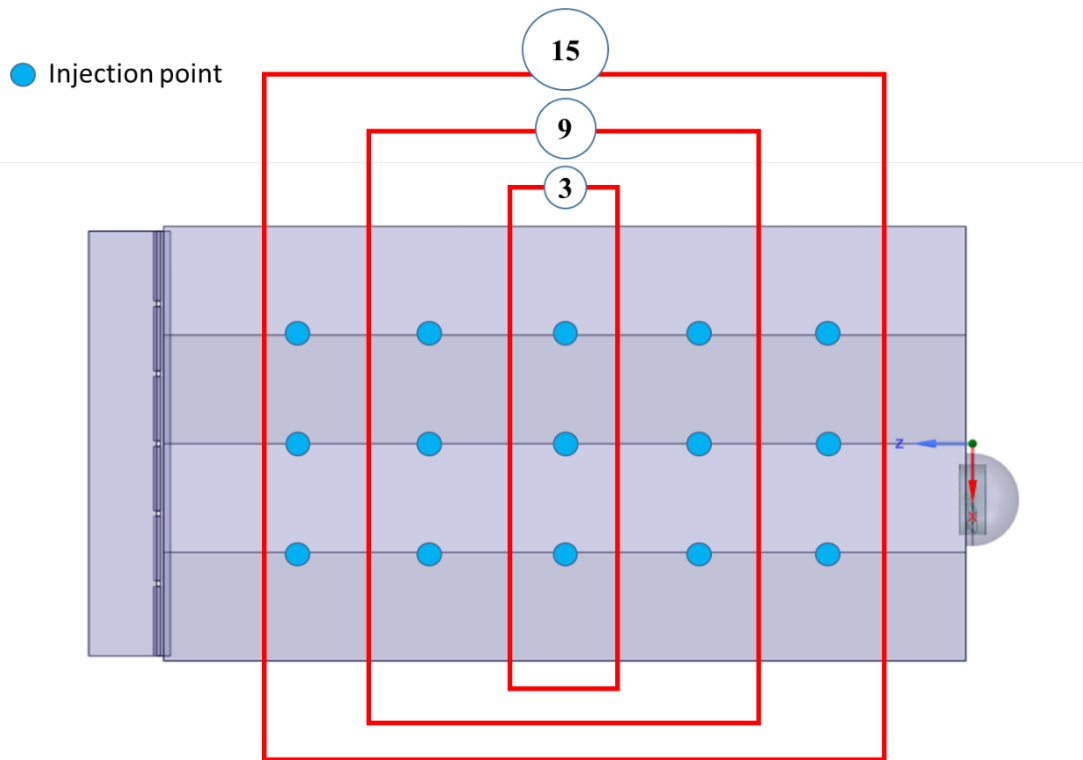


圖 3.10 溫室灑水點俯視配置圖

3.2 溫室實驗場實驗

本研究與國立臺東專科學校-園藝暨景觀科如圖 3.14進行合作，使用該校的日式玻璃溫室做為模擬模型。



圖3.11日式玻璃溫室建築-東專園藝科

3.2.1 溫室控制

為了節省人力往返臺東專科學校及大量收集數據，本研究採用物聯網技術進行遠端數據收集和定時控制水牆、灑水和風扇。主控器圖3.12使用STM32開發版來編譯，利用高低電平訊號來控制固態繼電器(SSR)，藉由SSR控制電磁閥(圖3.13)開關達到水牆與灑水的水源供給，考量到溫室原設計是利用抽水馬達將水從地下雨水收集槽抽出，將抽水機訊號線並聯到SSR上，當灑水或水簾牆訊號啟動時，抽水馬達會同步啟動。



圖3.12 主控器



圖3.13 電磁閥開關

3.2.2 物聯網(IOT)建立

圖4.14為物聯網架構圖，本研究使用無線傳輸模組(型號：ESP-01)，將溫室感測器數據透過TCP發送至實驗室伺服器端(Socket Server)，實驗數據會儲存在資料庫(PostgreSQL)，透過將數據利用Websocket發送到溫室網站上圖 3.20，可供溫室使用者即時的溫室資訊。

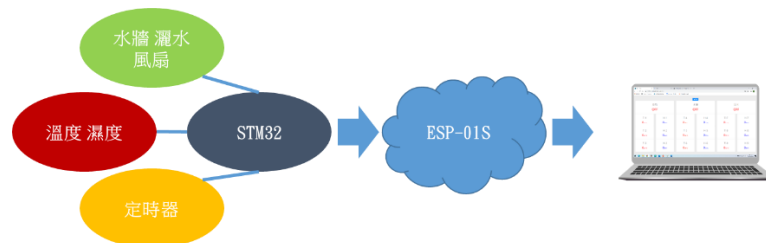


圖 3.14 物聯網系統架構

倒數 0		狀態 STOP	
風扇 OFF	水罐 OFF	澆水 OFF	
T1 27.20°C H1 99.90%	T4 null°C H4 null%	T7 null°C H7 null%	
T2 null°C H2 null%	T5 27.20°C H5 99.90%	T8 27.20°C H8 99.90%	
T3 27.20°C H3	T6 27.20°C H6	T9 27.20°C H9	

圖 3.15 即時溫室狀態網站

四、結果與討論

4.1 流場分析

本研究利用電腦輔助設計(CAD)軟體繪製玻璃溫室外型，並結合計算流體力學(CFD)軟體進行數值模擬分析。模擬分析可以在設計溫室初期，根據不同的外在環境條件帶入參數設定進行分析，例如：太陽的照射角度、大氣溫度、大氣濕度和大氣壓力等，可靈活的更改溫室內部的設備配置，例如：灑水系統、水簾系統和風扇系統等，如此便能更有效改善溫室內的環境效果，更可以節省設計研發的成本與時間。

本研究分為三個階段：

- (1) 設計階段 3D CAD 使用 SolidWorks 與 Ansys SpaceClaim 繪製溫室基本外型
圖 4.1，此模型主要分為溫室建築外牆、水簾牆和負壓風扇。
- (2) 在計算流體分析階段使用 Ansys-Fluent 計算溫室內部流場的相關物理量。
- (3) 透過 3D CAD 改變溫室內部灑水系統配置與風扇位置修正，並進行 CFD 模擬分析。

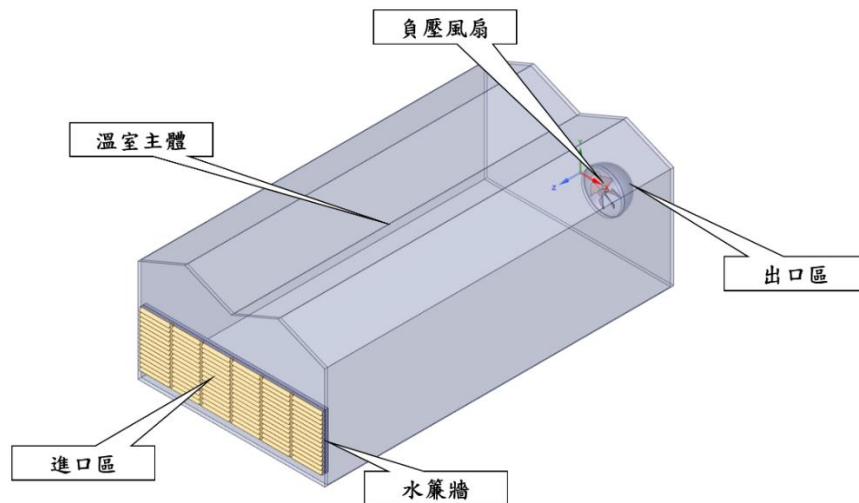


圖4.1 溫室基本系統區域定義

模型一：風扇轉速1000 RPM、無灑水、灑水頭高度3.2 m、灑水頭間距離1.94 m

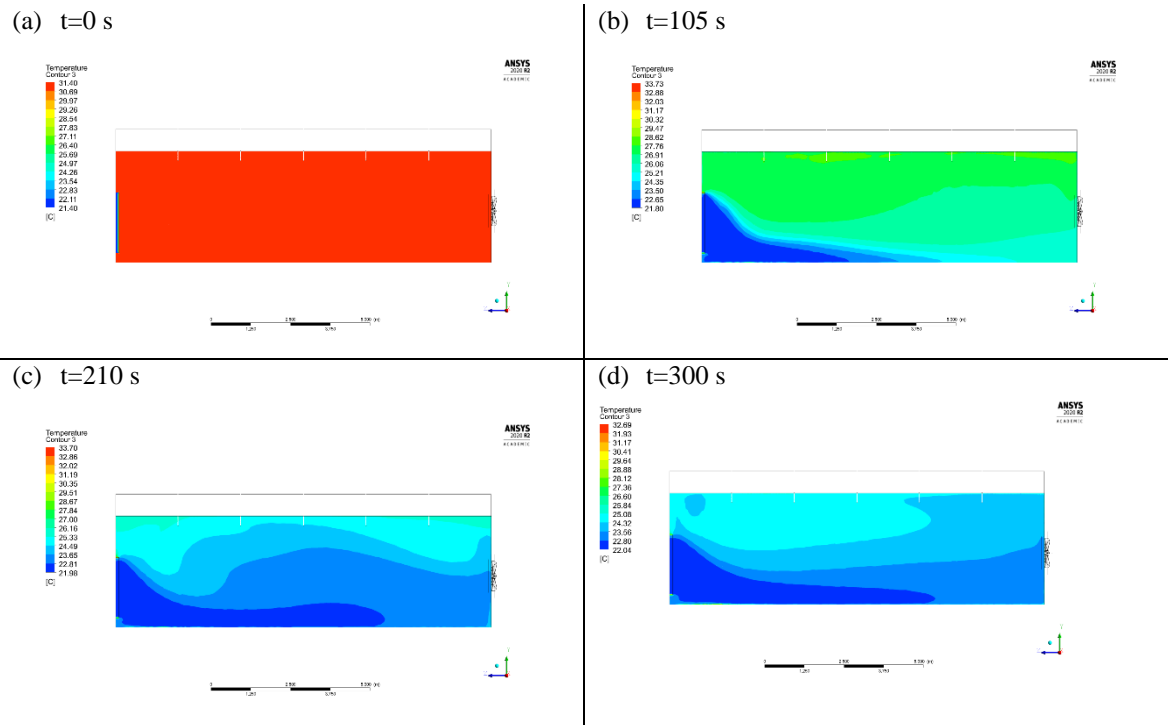


圖4.2 模型一YZ面溫度分布圖

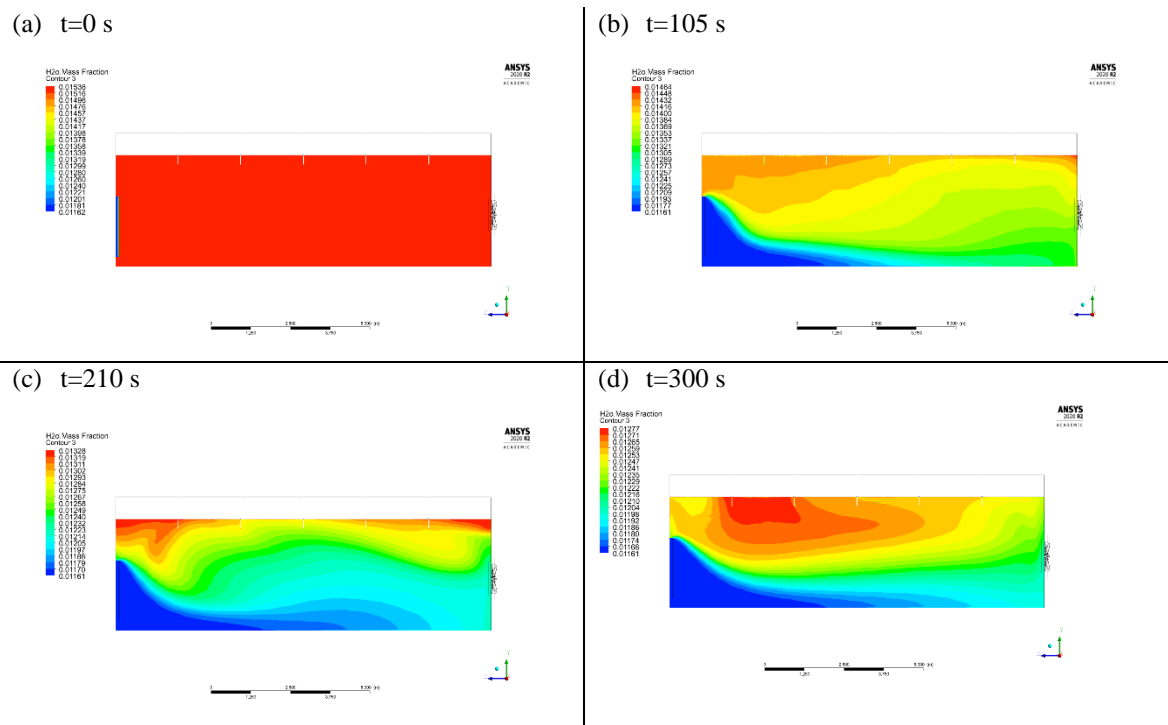


圖4.3 模型一YZ面比濕分布圖

模型二：風扇轉速1000 RPM、3個灑水點、灑水頭高度3.2 m、灑水頭間距離1.94 m

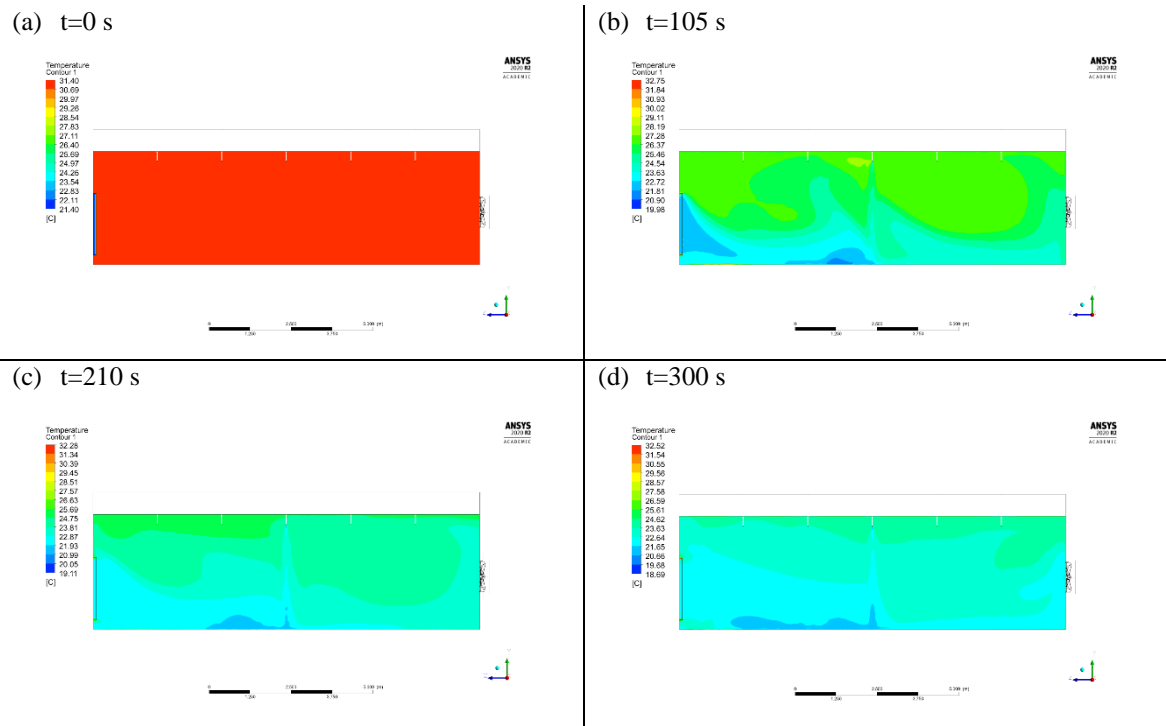


圖4.4 模型二YZ面溫度分布圖

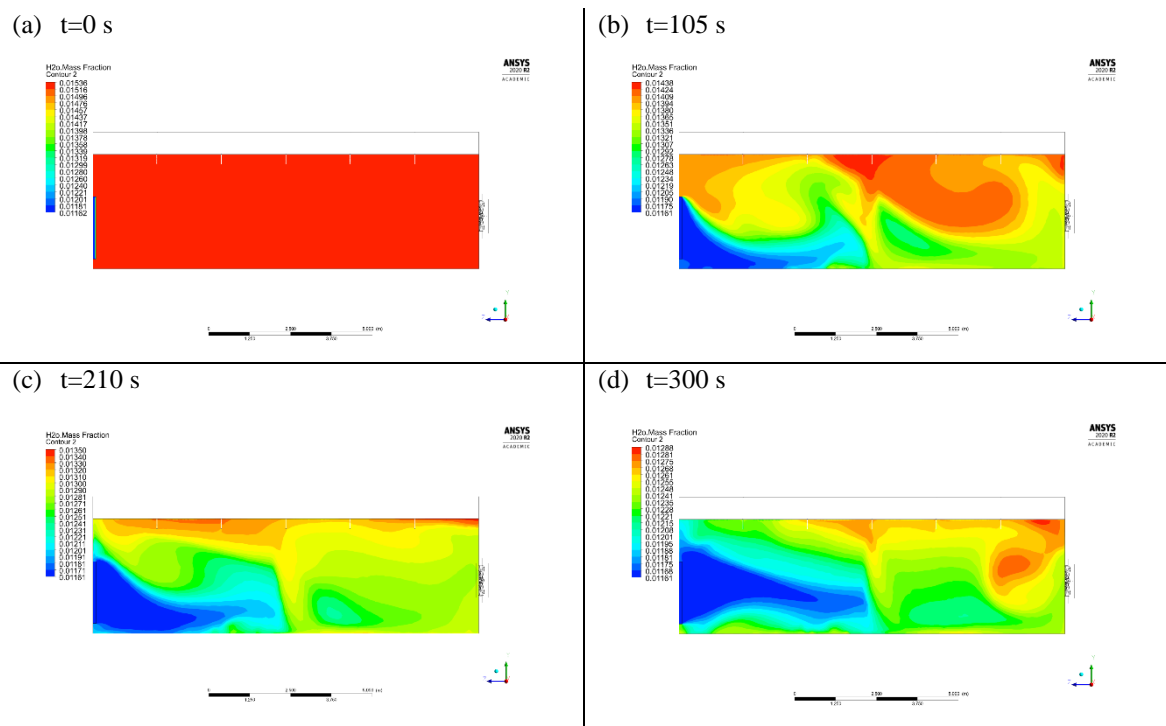


圖4.5 模型二YZ面比濕分布圖

模型三：風扇轉速1000 RPM、9個灑水點、灑水頭高度3.2 m、灑水頭間距離1.94 m

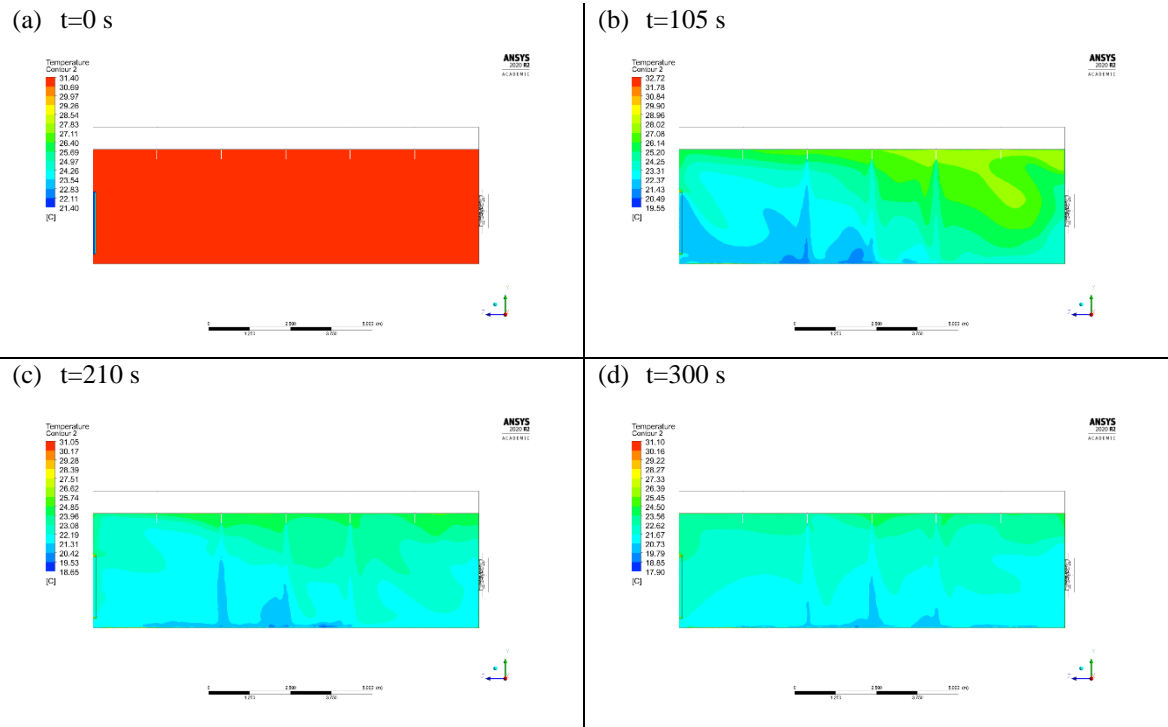


圖4.6 模型三YZ面溫度分布圖

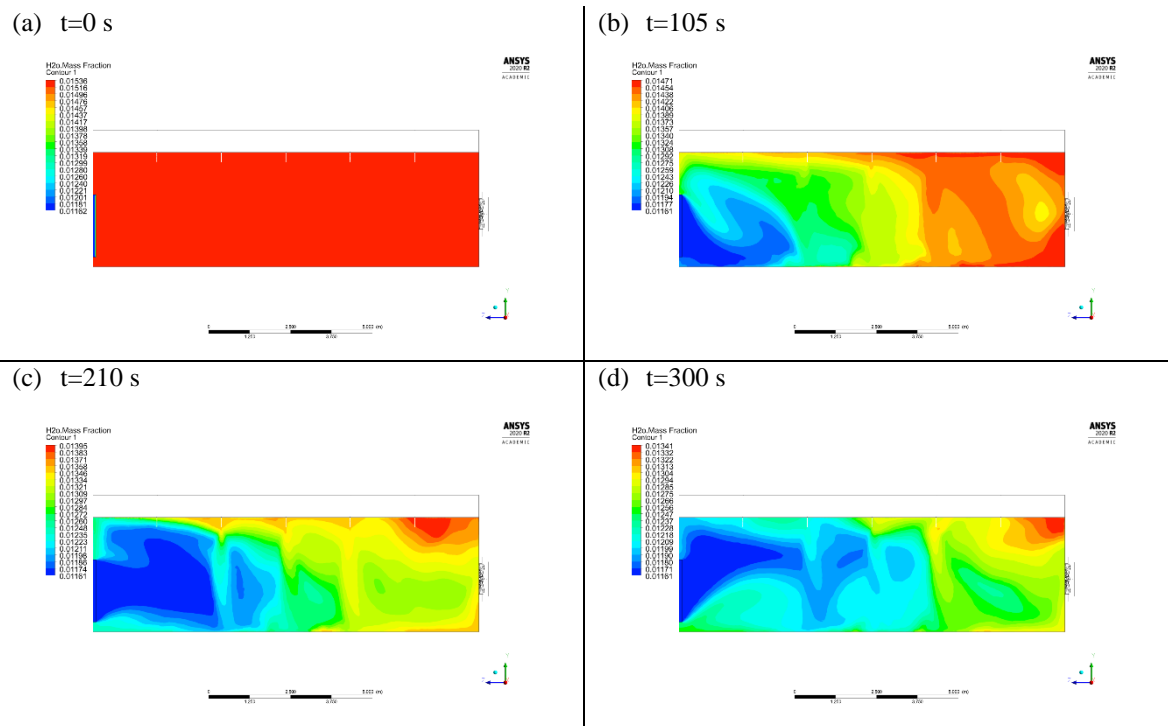


圖4.7 YZ面比濕分布圖

模型4：風扇轉速1000 RPM、15個灑水點、灑水頭高度3.2 m、灑水頭間距離1.94 m

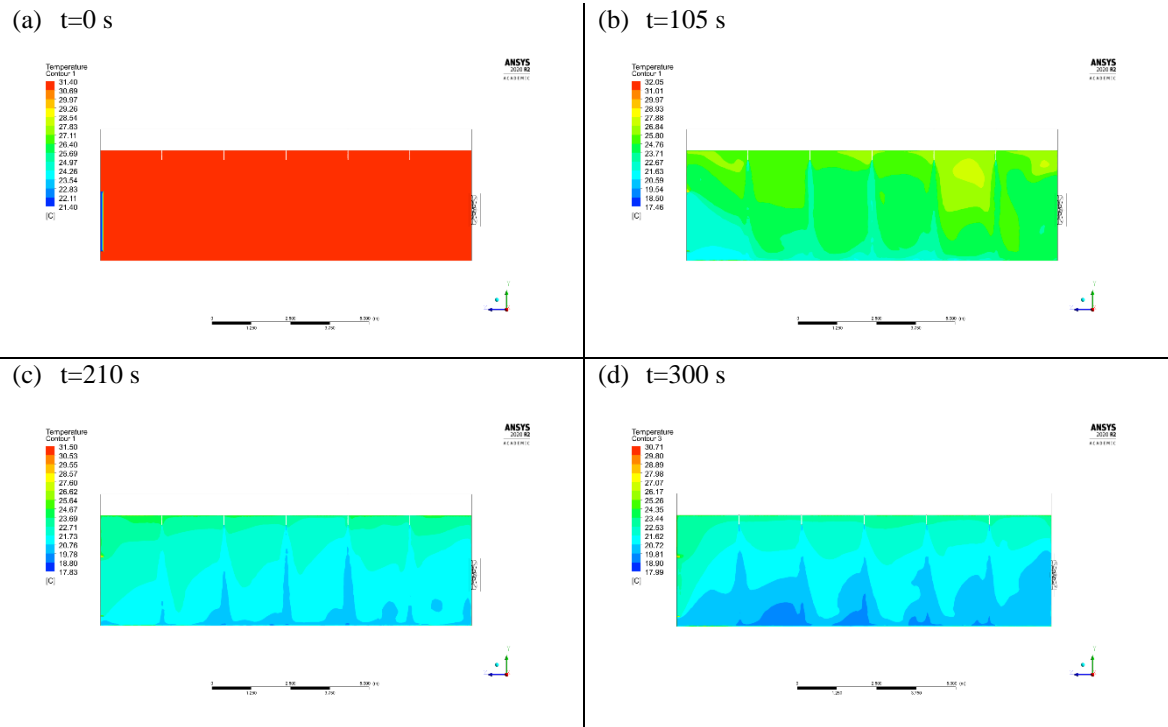


圖4.8 模型四YZ面溫度分布圖

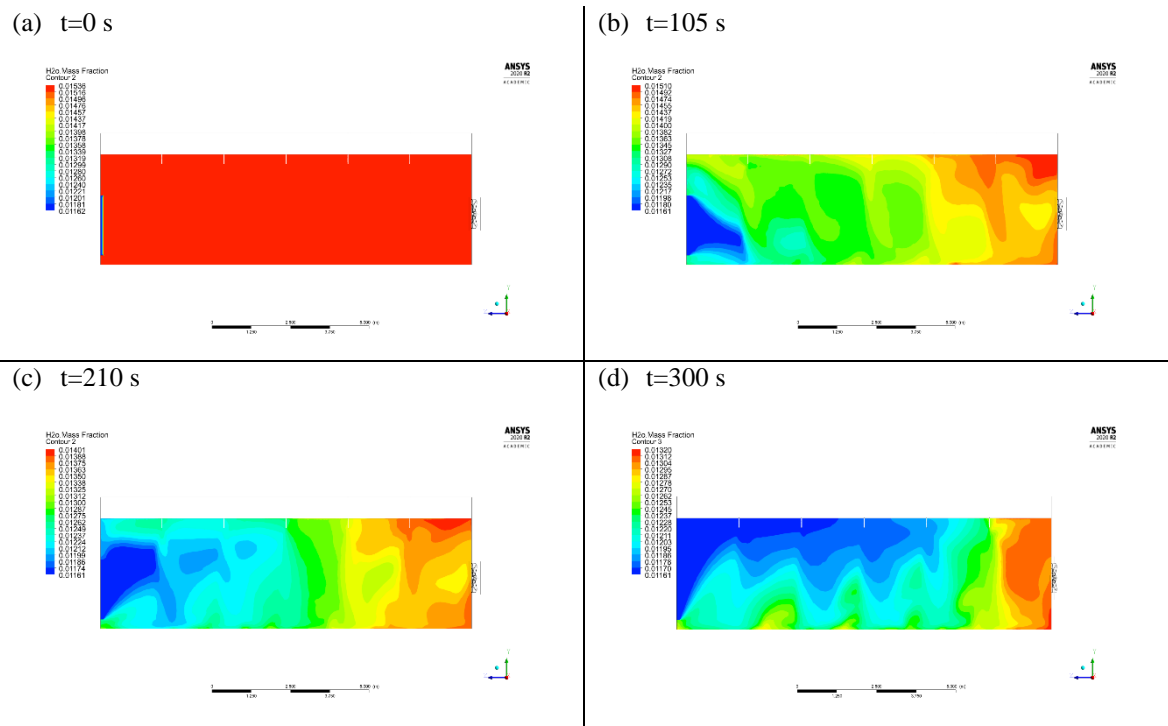


圖4.9 模型四YZ面比濕分布圖

4.2 結果分析

4.2.1 溫室模型數值模擬分析

本研究參考實際溫室灑水配置設計15個噴灑點四種不同模型，如模型1、模型2、模型3和模型4。圖4.21中(B)線為Z軸向通過溫室中心位置距離地面1.5 m；紅(R)線為X軸向通過溫室中心位置距離地面1.5 m；(G)線為Y軸向通過溫室中心位置，分別擷取四種模型數據進行分析。

圖 4.11 為四種模型之溫室內流場平均溫度，X軸為單位時間每15秒進行一次求解，模型4(sprinkler 15)降溫效果較其他3種模型來的大，模型1(sprinkler 0)溫度較其他3種模型高。

圖 4.12 為四種模型之溫室內流場平均相對溼度，X軸為單位時間每15秒進行一次求解，模型4(sprinkler 15)平均濕度較其他三種模型高。

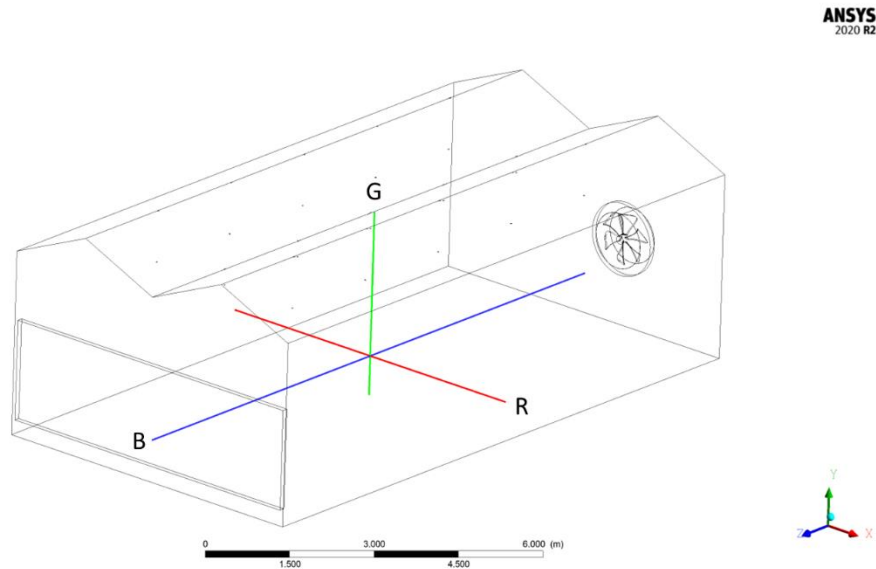


圖4.10 模擬數據擷取線

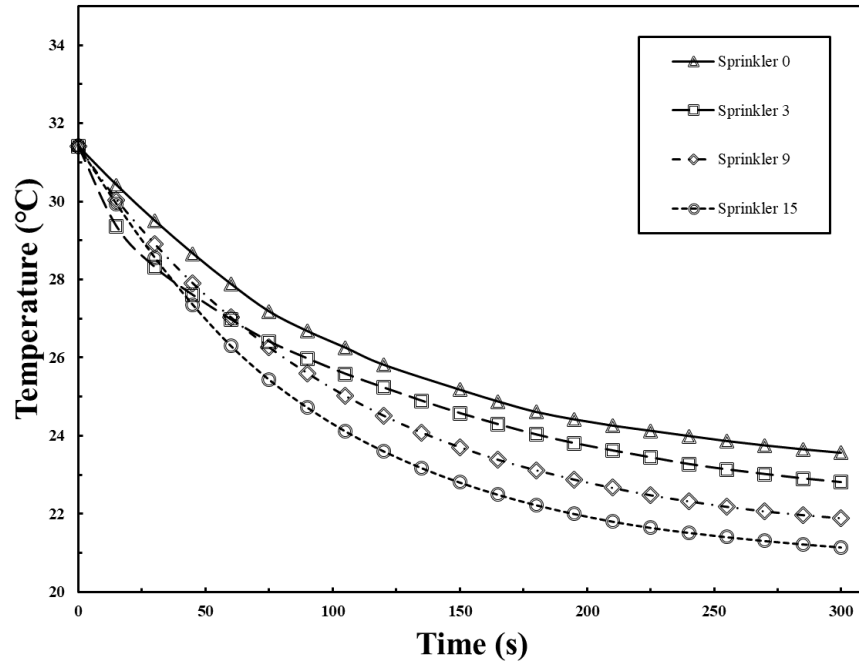


圖4.11 溫室內流場平均溫度隨時間變化

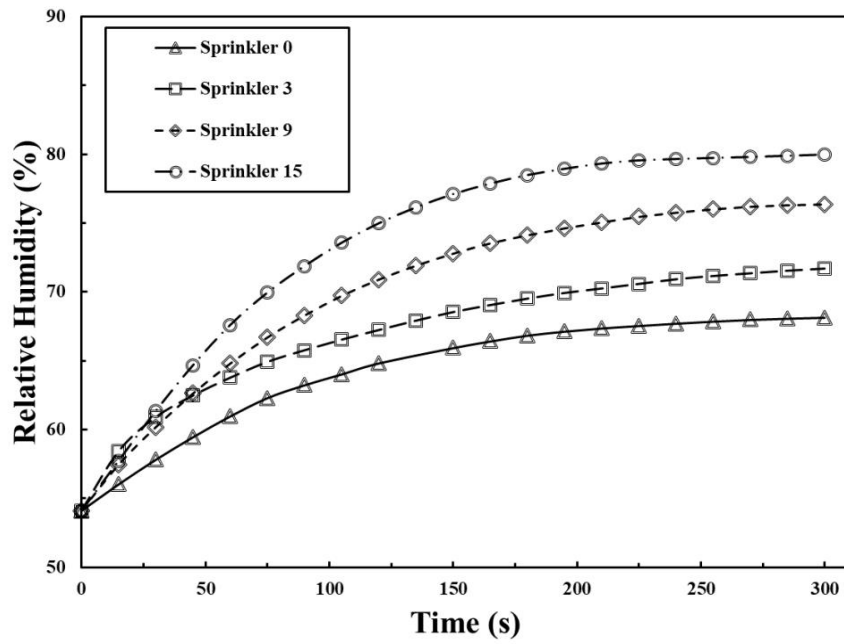


圖4.12 溫室內流場平均相對濕度隨時間變化

五、結論與未來展望

5.1 結論

本研究利用計算流體力學方法模擬日式玻璃溫室，使用 (Species transfer)多物種模型在流體(純空氣)中加入水蒸氣並考慮相對溼度；(Discrete Phase Model)離散相模型模擬溫室噴霧的粒子運動狀態，並以國立臺東專科學校-園藝暨景觀科日式玻璃溫室的實際狀況為參數設置考量，結合現代物聯網技術取得即時溫室內流場溫濕度變化，實驗結果與模擬情況進行比較，針對成果整理出以下結論：

1. 透過電腦輔助設計(CAD)軟體繪製溫室外型以及設計灑水點，結合計算流體力學(CFD)進行數值模擬分析，此方法應用可快速驗證溫室內流場之變化。
2. 物聯網技術便利，透過此技術快速達到遠端監視溫室溫濕度變化，結合資料庫進行大量數據收集。
3. 流場分析與實驗結果進行驗證分析，證明該模型是可行的。
4. 改變灑水點設計出四種模型分析，結果雖可預期，但藉由模擬分析可以結合多種環境因素進行參數設計，從數據中分析可得到灑水點數量明顯會影響溫室溫度與濕度，透過模擬分析可以量化此結果，作為溫室設計前期的參考依據。

5.2 未來展望

台灣目前正走向精緻農業的道路上，針對高價值的農作物環境需求設計溫室是不可或缺的一環，計算流體力學是一種可以有效降低研發設計成本的方法，本研究只進行了純流場之分析，並藉由已建造之溫室進行驗證分析，沒有進一步將階段研究成果加入溫室環境控制研究並栽培植栽，這是本研究相當遺憾的地方。此外溫室種類相當多元，除了本研究採用的日式玻璃溫室外，若能考慮不同類型的溫室，可以參考本研究應用之方法，進行模擬分析，或許能設計出符合需求的溫室。

參考文獻

- [1] Arbel, A., Yekutieli, O., & Barak, M. (1999). Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(2), 129-136.
- [2] Shukla, P., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H., Roberts, D. 等人. (2019). *IPCC, 2019: Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.*
- [3] 尤建琳(2002)。噴霧冷卻法配合擾流風扇於開放式溫室降溫之研究。國立中興大學。農業機械工程學系, 碩士, 60.
- [4] 林明仁, & 洪東奇. (2008). 訂定農業用溫室標準圖樣及其結構計算書簡介.(188)
- [5] 張昭玲(2016)。使用計算流體力學之植物工廠微氣候環境建模。國立臺北科技大學。新能源電控產業碩士專班, 碩士
- [6] 戴廷恩, 謝廷芳, & 陳淑佩. (2008). 全球暖化趨勢對臺灣花卉生產之影響。作物, 環境與生物資訊, 5(1), 73-75.
- [7] 顏銘志(2000)。超潔淨無塵室流場分析與改善之研究。國立臺北科技大學。電機與能源研究所, 碩士, 89.
- [8] 魏嘉言(2001)。計算流力程式在無塵室空氣流場分析之應用。國立清華大學。工程與系統科學系, 碩士, 129.
- [9] 江文琪(2005)。潔淨室面板儲存區之動態流場分析。國立臺灣科技大學。機械工程系, 碩士, 213.
- [10] 黃淳鴻(2006)。潔淨室內自動引導搬運車之三維動態流場影響分析。國立臺北科技大學。冷凍空調工程系所, 碩士, 55.
- [11] 陳宏源(2007)。廠房通風設計對污染排除之理論分析。國立勤益科技大學。冷凍空調系, 碩士, 67.
- [12] 周士傑(2010)。潔淨室光罩盒儲存區之動態流場分析。國立臺北科技大學。能源與冷凍空調工程系碩士班, 碩士, 79.
- [13] 吳承軒(2015)。Pcr 成型廠房設計與流場分析。國立雲林科技大學。機械工程系, 碩士, 52.
- [14] 吳育致(2015)。廠房通風設計與流場分析。國立雲林科技大學。機械工程系, 碩士, 46.
- [15] 方煒. (1994). 水牆設計與使用。農業機械學刊, 3(4), 57-70.
- [16] 方煒. (1995). 溫室蒸發冷卻系統降溫效果量化指標之建立。農業機械學刊, 4(2), 15-25.

- [17] 黃裕益. (1999). 噴霧冷卻法應用於臺灣地區塑膠布溫室內降溫之研究. *農業機械學刊*, 8(4), 17-27.
- [18] 楊力東(2005)。雙層玻璃立面在自然通風效果影響之研究--以 cfd 模擬整棟小學建築教室為例. 國立臺灣科技大學). *建築系, 碩士*, 169.
- [19] 秦銘志(2006)。Cfd 於溫室系統模擬之應用. 國立屏東科技大學). *機械工程系, 碩士*, 65.
- [20] 簡君良(2011)。植物工廠環境與養液灌溉監控物聯網之建置. 國立臺灣大學). *生物產業機電工程學研究所, 碩士*, 75.
- [21] 張延璋(2011)。應用無線感測器網路於植物工廠立體式栽植環境之監測分析. 國立臺灣大學). *生物產業機電工程學研究所, 碩士*, 84.
- [22] 陳柔臻(2014)。建立一用於植物工廠內之具植物結構模型的數值模型. 國立宜蘭大學). *生物機電工程學系碩士班, 碩士*, 45.
- [23] 邱煒勛(2017)。以數值模擬分析並優化植物工廠模型內流場環境. 國立宜蘭大學). *生物機電工程學系碩士班, 碩士*, 59.
- [24] Gordon, R. G. (1968). Error bounds in equilibrium statistical mechanics. *Journal of Mathematical Physics*, 9(5), 655-663.
- [25] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion* (pp. 96-116) Elsevier.
- [26] Leonard, B., & Mokhtari, S. (1990). ULTRA-SHARP nonoscillatory convection schemes for high-speed steady multidimensional flow.
- [27] Nguyen, P., Vervisch, L., Subramanian, V., & Domingo, P. (2010). Multidimensional flamelet-generated manifolds for partially premixed combustion. *Combustion and Flame*, 157(1), 43-61.
- [28] Rhie, C., & Chow, W. L. (1983). Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA Journal*, 21(11), 1525-1532.
- [29] Steele, R. C., Malte, P. C., Nicol, D. G., & Kramlich, J. C. (1995). NO_x and N₂O in lean-premixed jet-stirred flames. *Combustion and Flame*, 100(3), 440-449.
- [30] Taylor, P., & PJ, F. (1975). Some gray gas weighting coefficients for co₂-h₂o-soot mixtures.
- [31] Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 81(1), 89-96.
- [32] 春井企業股份有限公司. 春井抽水機泵浦 Water pump.<http://www.water-pump.com.tw/tw-p2.htm>
- [33] 段中喆(2015)。載於陳偉凱 (主編), *Ansys fluent 流體分析與工程實例* (第 10 月第一版 版)。北京市: 電子工業出版社。
- [34] Canonsburg, PA. (2021). ANSYS FLUENT 2021 R1. Theory Guide.