

園藝設施高壓噴霧降溫系統之性能測定

張壽山¹ 蘇煥評² 張銘璋³ 吳柏青^{4*}

1. 國立宜蘭大學生物機電工程學系研究生
2. 國立台灣大學生物產業機電工程系研究生
3. 善化工業股份有限公司業務部協理
4. 國立宜蘭大學生物機電工程學系教授

摘要

因夏季日照強烈易使園藝設施內產生熱累積問題，致使設施內部降溫儼然成為夏季迫切需要解決之問題。是故，粒子蒸發潛熱所能帶走的熱量是相當可觀的。本試驗研究針對高壓噴霧降溫系統進行不同噴頭孔徑與操作壓力，對於噴霧粒徑與流量關係之研究；並將該系統安裝於園藝設施，以進行設施內部降溫、加濕性能之測試與使用性之評估。於流量測定時，採以六號試驗噴頭、15MPa 之操作壓力，所測得之最大噴霧流量值為 370.17ml/min。進行粒徑測定時，就一號試驗噴頭、15MPa 之操作壓力，所測到之最小粒徑值為 22.30 μ m。至於設施內部加濕性能試驗中，噴霧系統作動後三分鐘，內部溫度可由原來的 37.60 $^{\circ}$ C 降至 31.60 $^{\circ}$ C，相對濕度亦由原本之 48.78% 增加至 88.50%，加濕效率值為 17.85%。當噴霧系統施以五分鐘試驗，內部溫度可自原來的 32.63 $^{\circ}$ C 降至 28.71 $^{\circ}$ C，相對濕度亦自原本之 61.83% 增加至 93.33%，蒸發冷卻效率為 68.21%；在兼顧作物栽培需要與作業成本之雙重要求下，蒸發冷卻技術實可將設施內部溫度降低於大氣溫度，為一個值得採用之降溫技術。

關鍵詞：噴霧降溫、影像處理、蒸發冷卻

Performance Measurement of High Pressure Mist Cooling Systems for Horticultural Facility

Shou Shan-Chang¹ Huan Ping-Su² Ming Chang-Chang³
Po Ching-Wu^{4*}

1. Graduate, Department of Biomechatronic Engineering, National Ilan University
2. Graduate, Department of Bio-Industrial Mechatronic Engineering, National Taiwan University
3. Assistant Manager of Business Dep., Shan-Hua Plastic Industrial Co., Ltd.
4. Professor, Department of Biomechatronic Engineering, National Ilan University

Abstract

Due to the strong sun shining in the summer, this will cause heat accumulation problem inside the facility. Therefore, the cooling becomes more important issue for greenhouse facility in the summer time. The purpose of this study was to determine the relationship of mist particle size and flow rate for various nozzle size and operating pressure in high pressure mist cooling system. The system was installed in a horticultural facility in order to evaluate the performance of cooling and humidifying inside the facility. The average misting flow rate is 370.17ml/min when No. 6 nozzle was used under 15 MPa operating pressure. Based on the analysis of particles size, the average mist particle size was 23.30 μm when No.1 nozzle was used under 15 MPa operating pressure. In the experiment of mist cooling performance inside the facility, the internal temperature dropped from 33.60 $^{\circ}\text{C}$ down to 31.60 $^{\circ}\text{C}$; the relative humidity increased from 48.78% up to 88.50%; and the efficiency of humidification was 17.85%. Under the consideration of plant nursing and operating cost, the technology of “Evaporative Cooling” was an effective way for cooling, which can reduce the internal temperature below the outside air temperature.

Key words: mist cooling, image processing, evaporative cooling

*Corresponding author E-mail : pcwu@niu.edu.tw

前言

園藝設施降溫有多種形式，如利用通風帶走熱量、利用水牆或水簾降溫、遮光來減少幅射熱、或者是應用噴霧的方式以降低溫度。於上述多種降溫方式中，噴霧降溫實為其中，工作效率高，且系統易於維護者，且安裝成本低，應用上也較為普遍。因此在台灣高溫的天候下，園藝設施的噴霧降溫系統是值得探討的。噴霧霧粒的大小影響溫度下降的程度，故噴霧之霧粒大小與溫度下降之關係是相當重要的 (林等, 1997; 方, 1998)。目前使用於溫室的蒸發冷卻降溫系統，較為普遍者有水簾式及噴霧式二種。在前者的分析上可採用蒸發冷卻效率 (evaporative cooling efficiency, E) 以評估噴霧降溫特性。E 的定義為外界空氣乾球溫度和通過水簾後空氣乾球溫度之差與外界空氣乾濕球溫差之比，如公式 (1) 所示。

$$E = \frac{T_{db} - T_x}{T_{db} - T_{wb}} \quad (1)$$

公式中 T_{db} 為外氣乾球溫度， T_{wb} 為外氣濕球溫度， T_x 為噴霧後乾球溫度。但於噴霧系統上，因其使用降溫效率 (η) 受到水壓、霧粒大小和通風量的影響甚巨，因此以蒸發冷卻效率評估其特性並不盡理想，故一般以蒸發比例 (evaporative fraction, β) 做為評估特性的指標。 β 之定義為霧粒蒸發量與噴霧量之比，蒸發比例值愈高，則表示所噴出之霧粒蒸發情形愈佳，沈降或附著造成之損失情形愈少。Bottcher 等 (1991) 並以能量平衡推導出 η 和 β 的關係，並歸納 Timmons and Baughman (1983) 和 Wilson 等 (1983) 的試驗數據，結果指出噴霧壓力為影響蒸發比例的最主要之因子，噴霧壓力愈高則其蒸發比例愈大。

Bottcher 及 Baughman, 1990 於溫室內，使用三種不同的噴霧與通風循環方式，探討噴霧作業之畜 (禽) 舍之環境模式，並比較通風與噴霧時間比例對降溫性能的影響。實驗結果顯示：噴霧時風扇停，而噴霧後風扇再啟動的運轉模式，能使雞舍內乾球溫度降低 4 度以上。而噴霧降溫系統之降溫能力影響因子則包括噴霧粒徑、空氣相對濕度、通風量和噴霧時間比例等因素。Bottcher 等 (1993) 探討相對濕度與霧粒的蒸發比例關係，得到當相對濕度範圍為 60%~96% 時，蒸發比例和濕度成反比之結論。Singletary 等 (1996) 對於平均粒徑為 65 μm 之霧粒，以試驗方法尋求不同的溫度和相對濕度下，蒸發比例之變化，得到蒸發比例隨著溫度上升而增加，因相對濕度升高而降低。噴霧系統之所以具有降溫效果乃因霧粒蒸發會吸取週遭空氣熱量之關係，故降溫能力受蒸發比例影響 (林等, 1997)。因此 Bottcher 等 (1991) 對於設施內噴霧降溫效率的定義為：降溫前後之乾球溫度差對大氣乾球溫度差的比值 (仇等, 1997)。

高壓噴霧加濕性能係以加濕效率 (Efficiency of Humidification, η) 進行評估，其定義為：噴霧前後設施內空氣所增加之水蒸氣量 (Q_1 , ml) 與高壓噴霧系統所噴出之理論噴霧水量 (Q_2 , ml) 之比值。其計算公式 (2)：

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100\% \quad (2)$$

其中噴霧前後空氣中所增加之水蒸氣量 Q_1 之計算公式如下：

$$Q_1 = \frac{V(H_2 - H_1)}{v_1 \cdot \rho} \times 10^6 \quad (3)$$

V = 設施內部體積, m^3
 H_1 = 噴霧前設施內空氣之絕對濕度, $kg H_2O/kg DA$
 H_2 = 噴霧後設施內空氣之絕對濕度, $kg H_2O/kg DA$
 v_1 = 噴霧前設施內空氣之比容, $m^3/kg DA$
 ρ = 水之密度, kg/m^3

而高壓噴霧系統所噴出之理論噴霧水量 Q_2 的計算公式如下：

$$Q_2 = F \times t \times N \quad (4)$$

F = 噴霧水量, ml/min

t = 噴霧時間, min

N = 噴頭數目

至於噴霧流量 (F , ml/min) 是會隨噴頭種類 (N_n) 及壓力 (P) 而改變, 如公式(5), 噴霧流量是噴頭種類與壓力的函數。

$$F = f(N_n, P) \quad (5)$$

N_n = 試驗噴頭的種類

P = 噴霧之操作壓力, MPa

為瞭解高壓噴霧降溫過程中設施內溫度及相對濕度之變化及分佈情形, 採用曲面繪圖軟體 (Surface Mapping System, Surfur 7.04) 繪製溫度及相對濕度之等高線分佈圖。此外, 計算溫度及相對濕度之標準差代表其分佈均勻度。

試驗材料與方法

降溫系統採用高壓噴霧降溫之方式, 利用善化公司所提供之 3/4 之高壓幫浦對水施加壓力, 經管路至噴頭噴出, 使霧水與高溫之空氣混合而蒸發, 來達到降溫效果。其各組件之規格如下：

(1) 高壓幫浦：採用廠牌為邦立捷, 作動型式為往復式運動, 操作壓力以 7MPa 為主, 其最大壓力可達 15MPa, 使用電壓為 220V。實驗中高壓幫浦操作壓力設定在 5MPa~15MPa 之間。

(2) 高壓管路：採用善化提供之高壓軟管 NVA (1/4"), 其操作壓力在於 7MPa 左右, 管之內徑為 6.35mm, 管之外徑為 12.5 (mm), 其爆破壓力可達 28MPa, 因此可耐高壓。

(3) 高壓噴頭：以 3 號噴頭為主, 材料取用於銅與不鏽鋼製成, 其噴頭間距為 1m, 噴頭數有 90 個。

於實驗前先架設一組影像處理系統, 以進行試驗時噴霧粒徑之計算。在進行粒徑分析實驗時採用解剖顯微鏡 (NIKON, Model SMZ-2T), 並於目鏡處架設 CCD 攝影機 (STC, Model 610A), 經由傳輸線接至電腦, 配合 CapView 視訊軟體 (WinFast CD, Version 1.40) 可將由傳輸線傳輸的影像在電腦螢幕中顯示, 將欲取樣之霧粒樣本由顯微鏡經 CCD 攝影機擷取後儲存於硬碟, 並以 .Jpg 的檔案格式儲存, 以利於後續的影像處理。

本研究使用 Optimas 影像處理軟體 (Version 5.1a), 以計算圖檔中的霧粒子大小及數目。

此次高壓噴霧降溫系統之研究, 主要為：(1) 噴頭孔徑與操作壓力對於流量之影響；(2) 操作壓力與噴頭孔徑對噴霧霧粒之影響；與 (3) 高壓噴霧降溫系統對於設施內部之降溫與加濕性能之測定。

流量測定

分別以 1~6 號試驗噴頭, 於不同操作壓力 (5MPa、7.5MPa、10MPa、12.5MPa、15MPa) 下, 量測其噴頭之流量。量測時間間隔為 1 min, 上述六種不同孔徑之噴頭, 皆進行二重複試驗, 最終取其平均值為流量測定值。

粒徑測定

採用 1~6 號試驗噴頭, 於不同操作壓力 (5MPa、7.5MPa、10MPa、12.5MPa、15MPa) 下量測其霧粒粒徑大小。霧粒採集方式是取一載玻片, 滴上直徑 15 mm 之 30 號機油 (SAE30, heavy duty Engine oil), 以手由下而上順勢擷取噴霧中自噴頭噴出之霧粒。由於霧粒暴露於空氣中會隨時間而蒸發, 所以利用載玻片之油滴實施粒徑採集, 使霧粒存在於油膜之中。使用的機油必須具有霧粒粒子能進入油內, 且粒子不可以與載玻片接觸到 (圖 1)。為滿足上述條件, 所以對於油之黏度與油膜厚

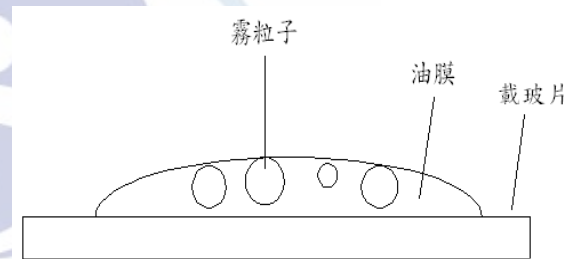


圖 1 油膜與霧粒子最佳分佈狀態
Fig.1 The best distributed condition of lubricant film and fog granules

度必須取之恰當, 因此採用 30 號機油。如果因溫度的關係, 影響了 30 號機油的黏度及比重, 可將 30 號機油混以適量柴 (煤) 油, 使比重比水小, 讓霧粒子沉入油膜中 (關, 1992)。取樣時載玻片力求乾淨, 若玻片上有灰塵, 會使得 30 號機油滴在載玻片上時, 油膜沒有足夠張力, 形成不良的油膜, 使霧粒無法完整的沒入油膜下, 導致霧粒迅速蒸發。

採集霧粒後隨即置於玻璃培養皿中, 並加蓋, 以減少霧粒蒸發而影響粒徑量測之準確度。粒徑之影像擷取與分析係採用立體解剖顯微鏡及影像擷取系統, 並以影像處理軟體進行粒徑量測。進行二重複試驗, 擷取 200 點之粒徑數值, 並取其平均值為霧粒粒徑。

噴霧降溫與加濕性能測定

為了解性能測定中環境參數之變化, 遂於測定過程中分別量測設施內外部溫度、相對濕度。設施內外之溫度及相對濕度量測則採用溫濕度紀錄器 (Escort Junior,

Model EJ-HS), 溫度誤差 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 相對濕度誤差 $\pm 3\%$, 資料擷取間隔設定為 1 分鐘, 擷取時間設為 30 分鐘。溫濕度記錄器放置距地面約 100 cm 之植床上方。降溫加濕性能測定配置詳如圖 2 與圖 3。

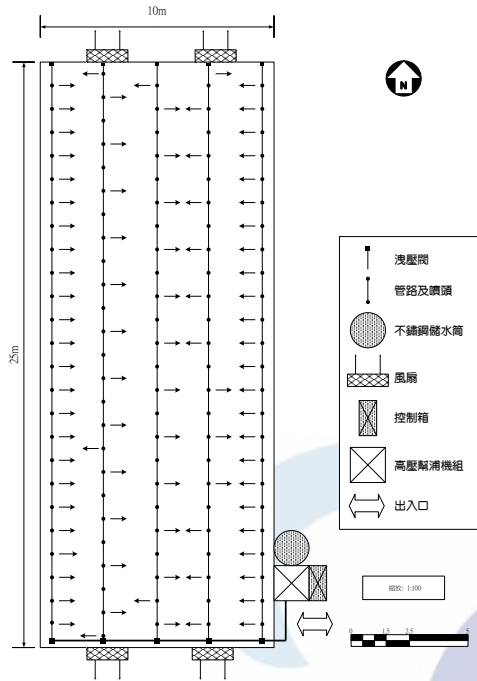


圖 2 園藝設施高壓噴霧降溫系統性能測定配置圖
Fig. 2 Layout for the performance measurement of horticultural facility with high pressure mist cooling system

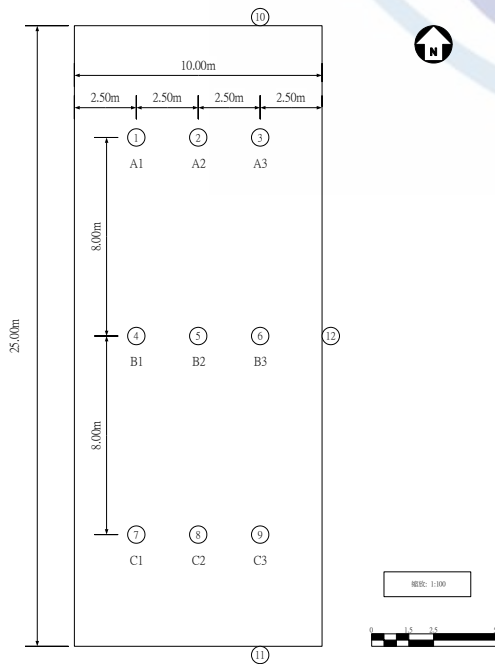


圖 3 園藝設施高壓噴霧降溫系統性能測定過程中溫濕度記錄器配置圖
Fig. 3 The location of temperature and humidity recorders in horticultural facility with high pressure mist cooling system

結果與討論

操作壓力及噴頭種類對流量試驗

操作壓力及噴頭種類明顯影響到噴霧流量值 (圖 4)。噴霧流量值會隨著操作壓力提升而增加, 在噴頭號數增加時, 其噴霧流量值亦隨之增加。試驗中, 採以一號噴頭, 5MPa 之操作壓力, 所測得之噴霧流量為最小, 其值為 33.78 ml/min; 若使用六號試驗噴頭, 15MPa 之操作壓力, 所測得的噴霧流量為最大, 其值為 370.17ml/min。由此可知, 噴霧流量與操作壓力、噴頭之孔徑之間成正比例之關係。

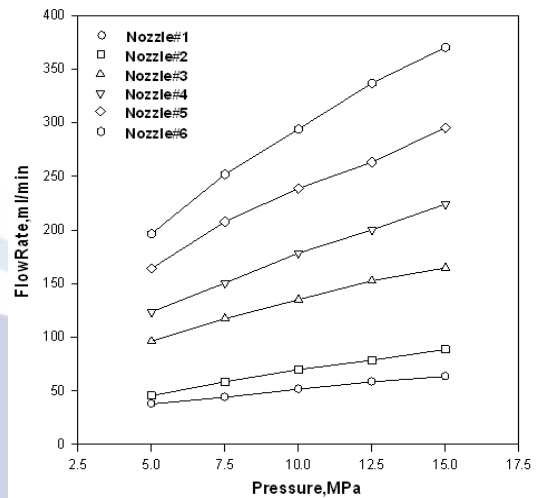


圖 4 操作壓力及噴頭種類對流量之影響
Fig. 4 The effects of operating pressure and nozzle types on the flow rate

操作壓力與噴頭種類對霧粒粒徑試驗

操作壓力及噴頭種類明顯影響霧粒粒徑 (圖 5)。操作壓力大時, 所測得之噴霧粒徑就小; 反之, 壓力小時, 噴霧粒徑就越大, 兩者關係成反比。試驗中, 以六號試

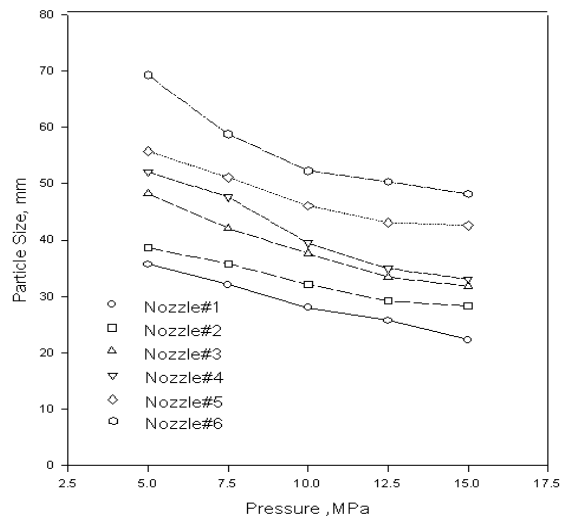


圖 5 操作壓力及噴頭種類對霧粒粒徑大小之影響
Fig. 5 The effects of operating pressure and nozzle types on the particle size

驗噴頭，5MPa 之操作壓力，所測得之粒徑值為最大，其值為 $69.25\mu\text{m}$ ；改以一號試驗噴頭，15MPa 之操作壓力，所測得之粒徑值為最小，其值為 $22.30\mu\text{m}$ 。粒徑愈細，則受到重力影響較小，是故漂浮時間愈久，蒸發比例愈大；反之，粒子愈大，終端速度就愈快，所以漂浮的時間就愈短。當操作壓力增加時，霧粒粒徑隨之減小；而噴頭號數增加時霧粒粒徑亦隨之增大。

噴霧加濕與降溫性能測定

當噴霧系統作動後三分鐘，內部溫度可由原來的 37.60°C 降至 31.60°C ，相對濕度亦由原本之 48.78% 增加至 88.50% ，加濕效率值為 17.85% 。

圖 6 為設施內部溫度與相對濕度於五分鐘內之變化情形。噴霧系統施以五分鐘試驗，內部溫度可自原來的 32.63°C 之高溫降至 28.71°C ；而相對濕度亦自原本之 61.83% 增加至 93.33% ，經計算後，蒸發冷卻效率為 68.21% 。

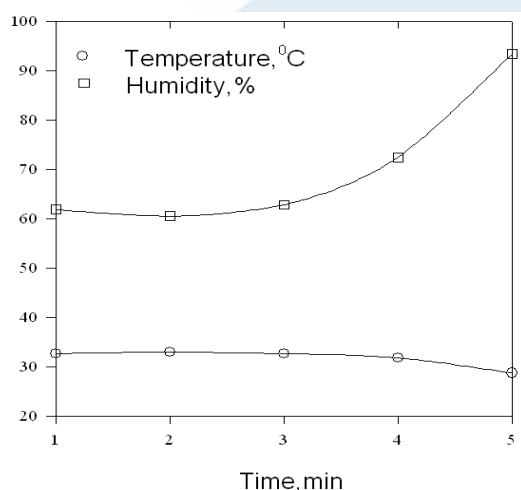


圖 6 園藝設施高壓噴霧降溫系統設施內部平均溫度變化情形

Fig. 6 The changes of average temperature and humidity inside the horticultural facility with high pressure mist cooling system

圖 7 為 7 月 11 日，上午 11:00 至 11:02 所紀錄之設施內部溫度分佈圖。試驗期間高低溫度差值可定義以一量化指標，用以表示溫度分佈的均勻程度與高低值。圖中溫度差值設為 0.5°C 。由於噴霧系統係進行間歇式動作，所以不同時段時在溫度分佈上有明顯差異。於圖中可看出：進行噴霧降溫試驗前，設施內部最高溫為 40.9°C ，分佈於設施中較為不通風且受日照之內側，而設施中間部份屬於溫度較低處，此時溫度標準差值為 $\pm 2.4^\circ\text{C}$ 。然而施以高壓噴霧試驗後三分鐘，設施內部最高溫度值可降至 30.1°C ，且溫度分布較為平均，溫度標準差值縮小為 $\pm 0.9^\circ\text{C}$ 。

圖 8 為 7 月 11 日，上午 11:00 至 11:02 所紀錄之設施內部濕度變化分佈圖。圖中濕度差值設為 10% 。由 11:00 之濕度分佈圖中可判斷內部相對濕度分佈極為不

平均，高低相對濕度差為 41% ，標準差為 $\pm 14.7\%$ 。並且呈現設施內部的相對濕度高，而設施外圍部分相對濕度較低之分佈；與同一時間之溫度分佈恰成相反。進行試驗前，設施內部之最低相對濕度為 39% ，施以高壓噴霧加濕試驗後三分鐘，相對濕度值可提升至 90.5% ，且標準差縮小至 $\pm 12.7\%$ ；相較之下，設施內部相對濕度分佈趨於較為平均。

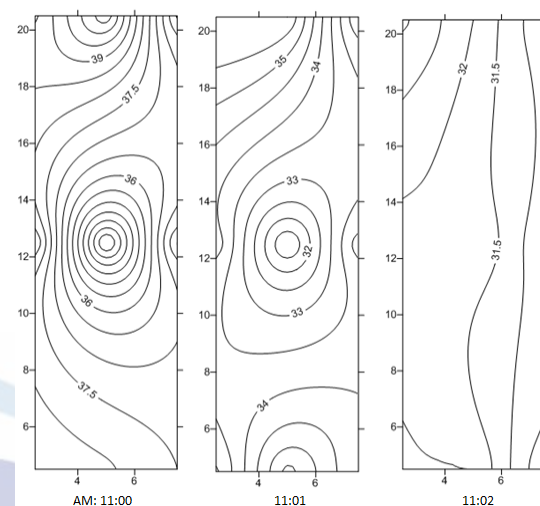


圖 7 高壓噴霧降溫系統性能測定過程中溫度變化情形

Fig. 7 The temperature change for the performance measurement of high pressure mist cooling system

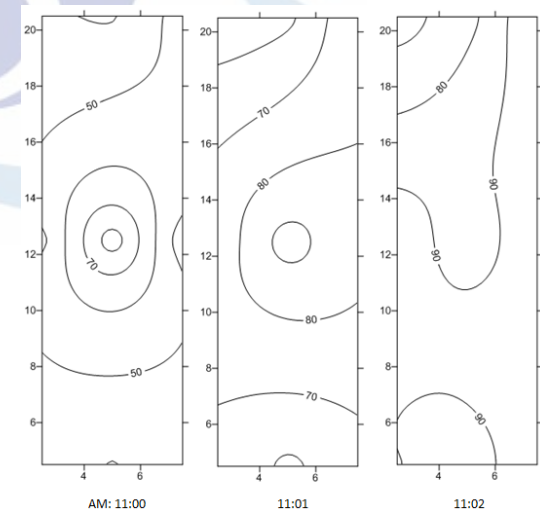


圖 8 高壓噴霧降溫系統性能測定過程中濕度變化情形

Fig. 8 The humidity change for the performance measurement of high pressure mist cooling system

結 論

本文為探討使用於園藝設施中高壓噴霧降溫系統之研究。主要為噴霧流量、霧粒粒徑、與設施內部加濕

降溫能力之測定。於流量測定試驗時，使用六號試驗噴頭，並以 15MPa 之操作壓力，測得其最大流量值為 370.17ml/min。在粒徑測定部分，採用一號試驗噴頭、15MPa 之操作壓力之條件下，所得到之粒徑數值為最小，其值為 22.30 μ m。當噴霧系統進行設施內部加濕降溫測定五分鐘時，內部溫度可降至 28.71 $^{\circ}$ C，而相對濕度亦增加至 93.33%，經計算後，蒸發冷卻效率為 68.21%。是故，該高壓噴霧系統使用於設施內部降溫是可行的。

測試當日 11:00 時室內空氣溫度為 37.60 $^{\circ}$ C，相對濕度為 48.78%。然而經過 3 分鐘加濕試驗，內部溫度可降至 31.60 $^{\circ}$ C，而相對濕度亦增加至 88.50%，經由計算，加濕效率值為 17.85%；因此也說明該系統是有助於設施內部之加濕作用。

誌 謝

本研究承善化工業股份有限公司提供試驗設備與場地；國立台灣大學方煒教授提供寶貴建議與資料；研究助理吳心蘭小姐及江伊騰、邱義龍、高孟正、陳虹仲等四位同學協助試驗之進行，謹此致謝。

參考文獻

- 仇立偉、林達德。1997。鴨舍動態熱環境模擬與控制策略之研究。農業機械學刊 6(1):1-18。
- 方煒。1998。溫室降溫方法。技術專輯第三期第 98004 號。行政院農業委員會種苗生產自動化服務團編印。
- 吳成柯、戴善榮、程湘君、雲立實。1996。數位影像處理。儒林圖書公司印行。台北。
- 李建儒。2000。數位影像處理技術之探討。機電整合雜誌社(16):122-127。
- 林正亮、朱健松、黃裕益。1997。噴霧降溫系統於開放式雞舍內的蒸發比例分析。pp.55:11-26。嘉義技術學院學刊。嘉義。
- 關昌揚。1992。農業機械實驗。初版，306-308。徐氏基金會出版社。台北。
- Bottcher, R. W., I. B. Singletary, and G. R. Baughman. 1993. Humidity effects on evaporative efficiency misting nozzle. 4th International Symposium on Livestock Environment. St. Joseph, MI:ASAE.1801-1809.
- Bottcher, R. W. and G. R. Baughman. 1990. Analysis of misting and ventilation cycling for broiler housing. Transaction of the ASAE 33(3):925-932.
- Bottcher, R.W., G. R. Baughman, R. S. Gates, and M. B. Timmons.1991. Characterizing Efficiency of Misting Systems for Poultry. American Society of Agricultural

Engineers 34 (2): 586-590.

Singletary, I. B., R. W. Bottcher, and G. R. Baughman. 1996. Characterizing effects of temperature and humidity on misting evaporative efficiency. Trans. ASAE 39(5):1801-1809.

Timmons, M. B. and G. R. Baughman. 1983. Experimental evaluation of poultry mist-fog systems. Trans. ASAE 26(1):207-210.

Wilson, J. L., H. A. Hughes, and W. D. Weaver. 1983. Evaporative cooling with fogging nozzles in broiler houses. Trans. ASAE 26(2):557-561.

100年 7月11日投稿
100年11月14日接受