



สมรรถนะการทำงานร่วมของโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกกับระบบระบายอากาศที่ควบคุมด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศ

Performance of Fogging Greenhouse with Ventilation System by Using Equilibrium Humidity Equation Control

เฉลิมชาติ เสาวรจ^{1*}, กระวี ตรีนามร¹, เทวรัตน์ ตรีนามร²

Chalermchart Saowarat^{1*}, Krawee Treeamnu¹, Tawarat Treeamnu²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

²School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel: +66-8-8719-0797, E-mail: chalermchart.s@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะการลดอุณหภูมิของโรงเรือนระบบพ่นหมอกซึ่งควบคุมการทำงานด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศที่พัฒนาขึ้น การทำงานของระบบใช้การพ่นหมอกภายในโรงเรือนร่วมกับการระบายอากาศเพื่อดึงความร้อนออกจากอากาศในรูปความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ ควบคุมการทำงานของหัวพ่นหมอกและพัดลมระบายอากาศด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้โปรแกรมซึ่งสร้างขึ้นจากการทำสมดุลความชื้นอากาศภายในโรงเรือน ทดสอบระบบพ่นหมอกกับโรงเรือนขนาดกว้าง 2 m ยาว 4 m และสูง 2 m ติดตั้งปั๊มน้ำความดันสูงขนาด 12 Bar และหัวพ่นหมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 0.1 mm จำนวน 4 หัว และพัดลมระบายอากาศ 2 ตัว พบว่าระบบสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 4.60°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอก ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิมีค่าระหว่าง 2.70% – 25.00% มีค่าเฉลี่ย 11.61% และสมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 2.72 – 19.00 มีค่าเฉลี่ย 9.27 โดยสิ้นเปลืองไฟฟ้าและน้ำเฉลี่ย 0.012 kWh day⁻¹ และ 1.88 kg_{water} day⁻¹ ตามลำดับ

คำสำคัญ: โรงเรือนเพาะปลูก, ระบบพ่นหมอก, สมดุลความชื้นอากาศ

Abstract

This research objective was to test the air cooling performance of greenhouse fogging system controlled by the developed equilibrium humidity equation. The cooperation of fogging and ventilating system in cooling process was used to removes the heat from the air in latent heat form by the evaporative cooling process. Fogging water pump and electric fan were controlled by microcontroller board used the developed mathematical models. The models were written by applying the equilibrium humidity equation for the prototype greenhouse system. The greenhouse size W x L x H is 2 m x 4 m x 2 m installs the 12 bar of high pressure water pump, 4 foggers of 0.1 mm in hole diameter and 2 ventilating fans. The test results showed that the system can reduce 4.60°C of the maximum difference temperature between outside and inside air of greenhouse. The cooling efficiency was between 2.70% - 25.00% and 11.61% in average. The coefficient of performance (COP) was between 2.72 – 19.00 and 9.27 in average. The system consumes an electric energy and water at 0.012 kWh day⁻¹ and 1.88 kg_{water} day⁻¹ respectively.

Keywords: Greenhouse, Fogging System, Equilibrium Humidity Equation

1 บทนำ

โรงเรือนเพาะปลูกเป็นระบบเพาะปลูกที่มีข้อได้เปรียบกว่าการเพาะปลูกแบบปกติหลายประการ อาทิ สามารถควบคุมธาตุอาหารให้เหมาะสมกับพืชได้ดี ลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรค แมลงศัตรูพืช และสามารถควบคุมสภาพอากาศให้เหมาะสม

การเจริญเติบโตของพืชได้ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเกษตรกรรม ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชในโรงเรือนคือรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในโรงเรือนซึ่งจำเป็นต้องควบคุมให้เหมาะสมกับความต้องการของพืช ระบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในโรงเรือนเพาะปลูกในพื้นที่เขตร้อน คือระบบการลดอุณหภูมิโดยการ

ระเหยของน้ำ (Evaporative cooling system) โดยข้อดีของระบบนี้คือช่วยให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนลดลงจากการระเหยของน้ำ ส่งผลให้พลังงานภายในโรงเรือนลดลง และทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงขึ้นด้วย โดยมีความเป็นไปได้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบทำความเย็นเชิงกลอีกด้วย (Hellickson and Walker, 1983)

การทำงานของระบบลดอุณหภูมิแบบพ่นหมอกซึ่งเป็นการระเหยน้ำแบบหนึ่ง อาศัยการพ่นหมอกขนาดเล็กผ่านหัวพ่นหมอก หมอกที่ได้นี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 60 μm เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ (Arbel et al., 2000) โดยจะพ่นหมอกเหนือพื้นที่เพาะปลูก ให้ตกอย่างอิสระและสัมผัสกับอากาศภายในโรงเรือน สามารถสร้างได้หลายวิธี หมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 30 μm สามารถสร้างได้จากการใช้ปั๊มที่มีแรงดันสูงกับหัวพ่นหมอก (Ozturk and Bascetincelik, 2002)

บทความวิจัยที่ผ่านมา (Arbel et al., 2000) พบว่าระบบทำความเย็นแบบพ่นหมอกมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนได้สม่ำเสมอกว่าระบบแผงรังผึ้งและพัดลม (Abdel-Ghany et al, 2006) ได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบพ่นหมอกด้วยน้ำในโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดโดยคำนวณจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล ทำการพ่นหมอกที่อัตราการไหล 10 g s^{-1} เป็นเวลา 30 60 และ 90 s ในคาบเวลา 90 180 และ 270 s พบว่าการพ่นหมอกเป็นเวลา 60 s ในคาบเวลา 180 s ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดประมาณ 30% (Kittas et al., 2001) ได้ทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนพบว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงถึง 80% และสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 10°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (Ozturk, 2003) ได้ทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกพบว่าประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่ออัตราการไหลของระบบพ่นหมอกและผลต่างของอัตราส่วนความชื้นระหว่างอุณหภูมิภายในโรงเรือนและภายนอกโรงเรือนเพิ่มขึ้น (Saowarat et al., 2018) ได้คำนวณเชิงตัวเลขของระบบลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกพบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 9.63°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน

แต่การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในโรงเรือนที่ใช้การพ่นหมอก จำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรหลักสองตัว คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอกและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้การควบคุมคาบเวลาการพ่นหมอกในโรงเรือนแบบระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control) เนื่องจากทำได้ง่าย แต่พบว่ามีข้อเสียคือขาดความแม่นยำ และมีความสิ้นเปลืองน้ำสูงมากอีกทั้งส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนสูงกว่าที่พืชต้องการ วิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหา ระบบควบคุมดังกล่าวได้คือการใช้ระบบควบคุมแบบปิด (Close loop control) ที่อาศัยการป้อนกลับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอกมารวม

ควบคุมการพ่นหมอกด้วย โดยใช้การคำนวณตามสมการสมดุลความชื้นช่วยในการกำหนดอัตราการพ่นหมอก ซึ่งจะช่วยให้เกิดความแม่นยำและลดปัญหาน้ำส่วนเกินในระบบ

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมสภาวะอากาศในโรงเรือนพ่นหมอกด้วยสมการควบคุมที่ได้จากสมดุลความชื้นอากาศและทดสอบสมรรถนะการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอก

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 โรงเรือนเพาะปลูกในการทดสอบ

โรงเรือนเพาะปลูกมีขนาดกว้าง 2 m ยาว 4 m สูง 2 m โดยใช้ท่อ PVC เป็นโครงสร้างและคลุมด้วยพลาสติก Polyethylene ประกอบด้วยระบบควบคุมและการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในโรงเรือน โดยวางตำแหน่งเซนเซอร์ระยะห่างเท่ากันเพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ทั่วถึง ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก โดยวางตำแหน่งของหัวพ่นหมอกเป็นระยะห่างที่เท่ากันเพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิได้อย่างทั่วถึง โดยตัวแปรที่พิจารณาในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นคืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกโรงเรือน เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในระบบพ่นหมอก ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะในหน่วย m แสดงดัง Fig. 1 และโรงเรือนจริงที่สร้างขึ้นแสดงดัง Fig. 2

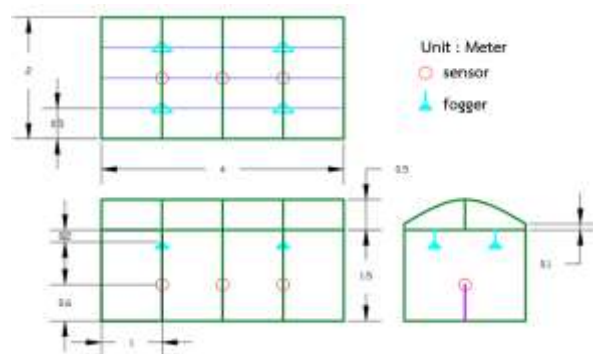


Figure 1. Greenhouse layout.



Figure 2. Experimental greenhouse.

2.2 ระบบควบคุม การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก

ระบบควบคุมใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 (บอร์ดและอุปกรณ์ควบคุมแสดงใน Fig. 3) ในการควบคุมระบบเนื่องจากมีข้อดีคือมีพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตเพียงพอในการต่อใช้งาน ติดตั้งเซนเซอร์ รุ่น DHT22 ของบริษัท Aosong Electronics สำหรับวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนโดยติดตั้งสูงจากพื้น 0.6 m จำนวน 3 จุด ซึ่งเท่ากับความสูงของโต๊ะเพาะปลูกทั่วไป และติดตั้งโมดูลนาฬิกา Real Time Clock รุ่น DS3231 จำนวน 1 ตัว ใช้สำหรับบอกเวลาให้กับ Arduino และโมดูล Micro SD card จำนวน 1 ตัว สำหรับเป็น Data logger ในการเก็บข้อมูลและโมดูล Relay จำนวน 3 ตัว เพื่อควบคุมพัดลมและปั๊ม ของบริษัท Arduinoall ระบบระบายอากาศใช้พัดลมดูดอากาศรุ่น APC20-3 25 W ขนาด 8 นิ้ว อัตราการไหล $7 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ของบริษัท LONB จำนวน 2 ตัว ซึ่งสามารถระบายอากาศได้ 1 Air change rate (Henlickson and Walker, 1983) และระบบพ่นหมอกใช้ปั๊มความดัน 12 Bar และหัวพ่นหมอกความดันสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 mm ชนิด 1 รู ของบริษัท Fogeasy ทำการทดสอบในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ 2561 ตั้งแต่เวลา 9.30 น. – 17.30 น. โดยบันทึกค่าทุกคาบเวลา 15 min และนำข้อมูลบันทึกไว้ที่ Data logger ของระบบควบคุม

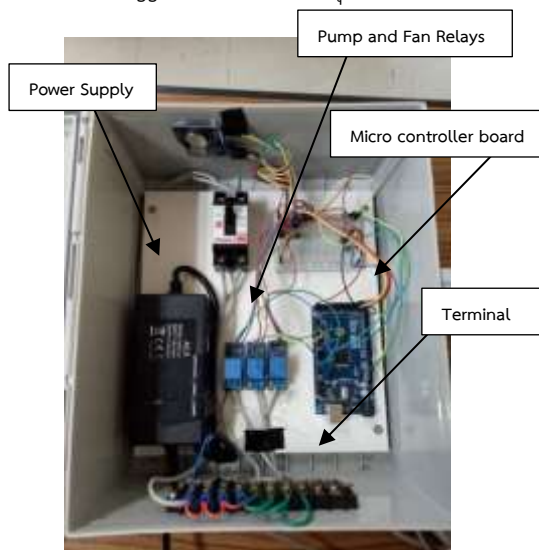


Figure 3. Control box.

2.3 สมการสมดุลความชื้นอากาศ

2.4 กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น

จาก Fig. 4 Psychrometric chart แสดงให้เห็นถึงกระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นของระบบเมื่อใช้วิธีการพ่นหมอก โดยจุด U คืออากาศภายในโรงเรือนก่อนทำการพ่นหมอก จุด I คืออากาศภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอกตามสภาวะที่ต้องการควบคุม ที่จุด W คือจุดที่อากาศอิ่มตัวด้วยความชื้น กระบวนการลดอุณหภูมิจะดำเนินจากจุด U ไปตามเส้น

กระเปาะเปียกคงที่จนถึงเส้นความชื้นอิ่มตัวที่จุด W ซึ่งเราอาจหยุดกระบวนการก่อนถึงจุด W ไว้ที่จุด I ตามสภาวะอากาศที่ต้องการควบคุมในโรงเรือน T_u คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน

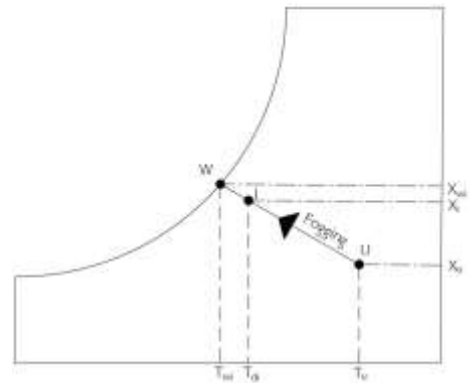


Figure 4. Process on psychrometric chart.

โรงเรือนก่อนการพ่นหมอก ($^{\circ}\text{C}$) T_{di} คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอก ($^{\circ}\text{C}$) T_{wi} คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก ($^{\circ}\text{C}$) x_u x_{wi} x_i คืออัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอกหลังการพ่นหมอกที่สภาวะอากาศอิ่มตัวและหลังการพ่นหมอกตามสภาวะควบคุมในหน่วย $\text{kg}_w \text{ kg}^{-1} \text{ dry air}$ ตามลำดับ

2.4.1 สมการการคำนวณของระบบ

การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการพ่นหมอกจำเป็นที่จะต้องหาความดันไอน้ำอิ่มตัว ความดันไอและเอนทาลปี โดยความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จาก eq. 1 (ASHRAE, 2001)

$$\ln p_{ws} = C_1 / T + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T \quad (1)$$

โดยที่ p_{ws} = ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa)
 T = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 $C_1 = -5.8002206 \times 10^3$
 $C_2 = 1.3914993 \times 10^0$
 $C_3 = -4.8640239 \times 10^{-2}$
 $C_4 = 4.1764768 \times 10^{-5}$
 $C_5 = -1.4452093 \times 10^{-8}$
 $C_6 = 6.5459673 \times 10^0$

ความดันไอสามารถคำนวณได้จาก eq. 2 (ASHRAE, 2001)

$$p_w = p_{ws} \phi \quad (2)$$

โดยที่ p_w = ความดันไอน้ำจริงในอากาศ (Pa)
 ϕ = ความชื้นสัมพัทธ์

อัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จาก eq. 3 (ASHRAE, 2001)

$$X = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (3)$$

โดยที่ X = อัตราส่วนความชื้น ($\text{kg}_w \text{ kg}^{-1} \text{ dry air}$)
 p = ความดันอากาศมีค่า 101.325 kPa

เอนทาลปีสามารถคำนวณได้จาก eq. 4 (ASHRAE, 2001)

$$h = 1.006T + X(2501 + 1.805T) \quad (4)$$

โดยที่ h = เอนทาลปี ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ dry air}$)

ปริมาตรจำเพาะของอากาศสามารถคำนวณได้จาก eq. 5 (ASHRAE, 2001)

$$v = 0.2871(T + 273.15)(1 + 1.6078X) / p \quad (5)$$

โดยที่ v = ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ dry air}$)

อุณหภูมิภูมิกระเปาะเปียกสามารถคำนวณได้จาก eq. 6 (Stull, 2011)

$$T_{wi} = T \text{atan}[0.151977(RH\% + 8.313659)^{1/2}] + \text{atan}(T + RH\%) - \text{atan}(RH\% - 1.676331) + 0.00391838(RH\%)^{3/2} \text{atan}(0.023101RH\%) - 4.686035 \quad (6)$$

โดยที่ T_{wi} = อุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}\text{C}$)
 $RH\%$ = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)

กำหนดให้การคำนวณปริมาณน้ำพ่นหมอกเป็นแบบสภาวะคงตัว (Steady-state condition) โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์และเป็นไปตามกฎทรงมวล โดยการคำนวณหาได้จาก eq. 7

$$m_w = \frac{m_a(x_i - x_u)}{v_u} \quad (7)$$

โดยที่ m_w = ปริมาณน้ำพ่นหมอก (kg_w)
 m_a = ปริมาตรอากาศในโรงเรือน (m^3)
 v_u = ปริมาตรจำเพาะของอากาศในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ dry air}$)

ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอกคือสัดส่วนของผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังการพ่นหมอกกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกหลังการพ่นหมอก และสามารถคำนวณได้ eq. 8 (Ozturk, 2003)

$$\eta_{cool} = \frac{T_u - T_{di}}{T_u - T_{wi}} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ η_{cool} = ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอก

สมรรถนะการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอก (Coefficient of Performance) สามารถคำนวณได้จาก eq. 9

$$COP = \frac{m_a c_{p,air} (T_{di} - T_u)}{W_{pump} t_{pump}} \quad (9)$$

โดยที่ COP = สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ

$c_{p,air}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ ($\text{kJ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

W_{pump} = กำลังไฟฟ้าของปั๊ม (kJ s^{-1})

t_{pump} = ระยะเวลาที่ปั๊มทำงาน (s)

และจาก Fig. 4 ที่จุด I สามารถคำนวณหาอุณหภูมิอากาศที่ค่าวาระบบจะสามารถลดอุณหภูมิลงได้ (T_{di}) ด้วย eq. 4

2.4.2 ขั้นตอนการคำนวณและการควบคุม

การคำนวณอัตราการไหลของระบบพ่นหมอกเริ่มคำนวณเมื่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนแล้วส่งค่ามาที่บอร์ดควบคุมเพื่อทำการคำนวณหาความดันไอน้ำอิ่มตัวจาก eq. 1 ความดันไอน้ำจาก eq. 2 อัตราส่วนความชื้น x_u จาก eq. 3 เอนทาลปีจาก eq. 4 ปริมาตรจำเพาะของอากาศ v_u จาก eq. 5 และอุณหภูมิกระเปาะเปียก T_{wi} จาก eq. 6

จากนั้นใช้อุณหภูมิ T_{wi} และความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH คำนวณซ้ำจาก eq. 1 – 3 เพื่อหาอัตราส่วนความชื้น x_{wi} กำหนดให้ระบบพ่นหมอกเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับอากาศจนถึงจุด I โดยเพิ่มปริมาณน้ำให้กับอากาศเป็น 80% ของปริมาณน้ำในอากาศเมื่ออิ่มตัวไปด้วยความชื้น (เท่ากับค่า x_{wi} ณ ขณะนั้น) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ x_i

ทั้งนี้การกำหนดตำแหน่งของจุด I ที่ 80% ของ x_{wi} ทำเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในโรงเรือนเพิ่มขึ้นจนใกล้จุดอิ่มตัวมากเกินไป (100%) เพราะละอองน้ำจากการพ่นหมอกอาจจะแห้งเป็นไอได้ไม่หมดกลายเป็นหยดน้ำสะสมในระบบซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองน้ำและอาจทำให้พืชบางชนิดได้รับความชื้นมากเกินไปจนเกิดความเสียหายได้

จากนั้น คำนวณหาปริมาณน้ำพ่นหมอกจาก eq. 7 และใช้ค่าอัตราการไหลของปั๊มน้ำที่ทราบค่าช่วยในการคำนวณหาระยะเวลาการทำงานของปั๊มได้

สมการและขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดถูกโปรแกรมไว้ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ กำหนดให้หนึ่งรอบการทำงานของโปรแกรมใช้เวลา 90 s โดยพัลลวมจะถูกปิดตอนเริ่มต้นการทำงาน จากนั้นระบบควบคุมการพ่นหมอกจะสั่งเปิดปั๊มน้ำความดันสูงตามระยะเวลาการทำงานของปั๊มที่คำนวณได้ เมื่อเสร็จสิ้นการพ่นหมอกแล้ว พัลลวมจึงถูกสั่งให้เปิดการทำงานเท่ากับเวลาที่เหลือ

จากการพ่นหมอกจนถึงเวลา 90 s ที่กำหนด ก่อนเริ่มกระบวนการทำงานในรอบถัดไป Flow Chart ของระบบควบคุมแสดงใน Fig. 5

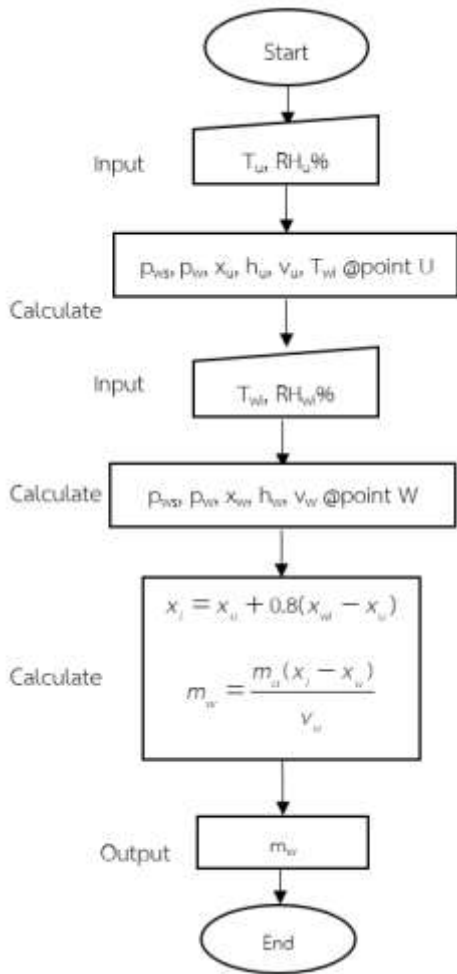


Figure 5. Flow chart process.

3 ผลและวิจารณ์

การทดสอบการทำงานของโรงเรือนในเดือนกุมภาพันธ์ 2561 ระหว่างเวลา 9.30 น. - 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

3.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ

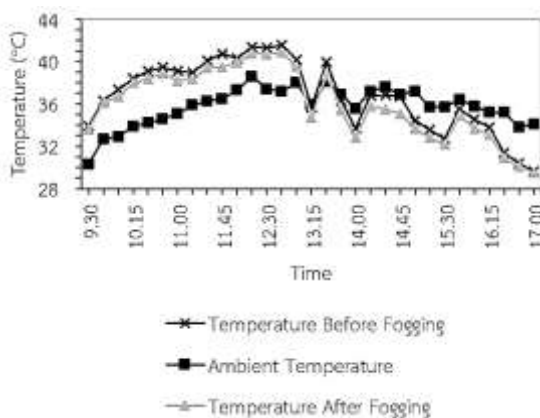


Figure 6. Temperature in greenhouse and ambient during the day.

จาก Fig. 6 ความสามารถในการลดอุณหภูมิพบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. - 13.00 น. อุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าระหว่าง 30.30°C - 37.30°C มีค่าเฉลี่ย 34.52°C อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอกมีค่าระหว่าง 33.93°C - 40.77°C มีค่าเฉลี่ย 38.54°C เมื่อระบบพ่นหมอกแล้วพบว่าในช่วงเช้าอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 33.60°C - 39.90°C มีค่าเฉลี่ย 37.92°C ซึ่งผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 0.23°C - 1.27°C โดยมีค่าเฉลี่ย 0.62°C

ในช่วงบ่าย 13.00 น. - 17.00 น. อุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าระหว่าง 33.80°C - 38.60°C มีค่าเฉลี่ย 36.43 °C อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอกมีค่าระหว่าง 29.60°C - 41.57°C มีค่าเฉลี่ย 35.82°C และหลังการพ่นหมอกอุณหภูมิอากาศมีค่าระหว่าง 29.50°C - 40.90°C มีค่าเฉลี่ย 35.05°C โดยที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 0.10°C - 1.60°C และมีค่าเฉลี่ย 0.77°C

อุณหภูมิภายในโรงเรือนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกเนื่องจากโรงเรือนซึ่งเป็นระบบปิดได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ทำให้อากาศภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างอิสระเหมือนระบบเปิด จึงเกิดเป็นสภาวะเรือนกระจกขึ้น

ในช่วงเช้าผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าน้อยเนื่องจากความชื้นในอากาศภายนอกโรงเรือนยังมีค่าสูง (Fig. 7) ประกอบกับอากาศมีอุณหภูมิต่ำ เมื่ออากาศถูกนำเข้าสู่โรงเรือนจึงสามารถรับไอน้ำที่ระเหยจากละอองหมอกเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยโดยที่อิทธิพลของสภาวะเรือนกระจกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศในโรงเรือนสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ผลกระทบนี้ทำให้ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกมีค่าต่ำไปด้วย (Fig. 8)

ในช่วงเวลา 13.00 - 14.00 พบว่าท้องฟ้ามีเมฆมากและอากาศเย็นลงส่งผลให้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เข้าโรงเรือนได้น้อยลงและทำให้อุณหภูมิในช่วงเวลาดังกล่าวมีความแปรปรวนดังแสดงใน Fig.6

ในช่วงบ่ายผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่ตลอดช่วง (Fig. 6) ประกอบกับความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำลง (Fig. 7) ส่งผลให้

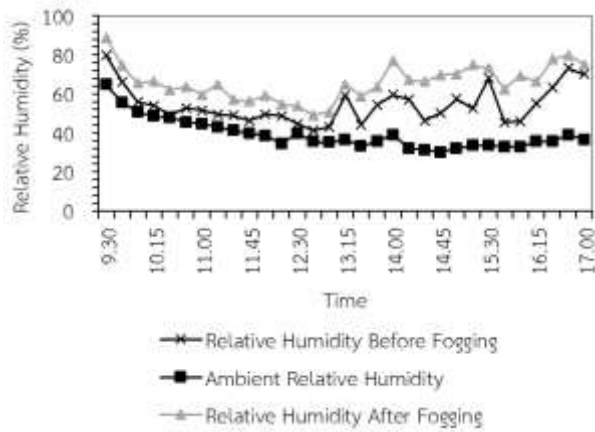


Figure 7. Relative Humidity during the day.

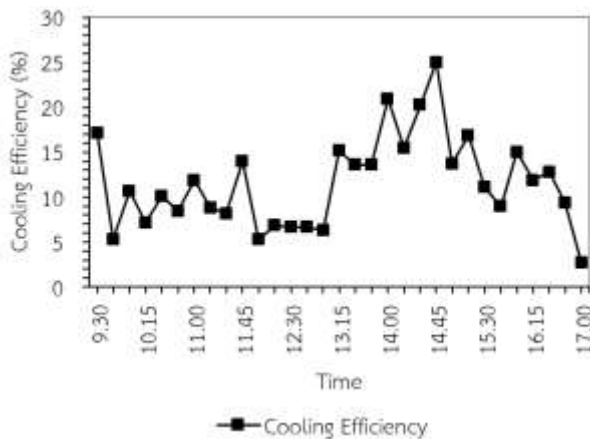


Figure 8. Cooling Efficiency during the day.

ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกมีค่าสูงขึ้นด้วย (Fig. 8) โดยอุณหภูมิภายในโรงเรือนมีค่าที่ลดลงเนื่องมาจากผลของการถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่น้ำในรูปของพลังงานความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง น้ำจะได้รับความร้อนจากอากาศและเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำแล้วจึงถูกดูดออกจากโรงเรือนโดยพัดลมระบายอากาศ ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 4.60 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนและประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่าระหว่าง 2.70% – 25.00% โดยมีค่าเฉลี่ย 11.61% การพ่นหมอกในช่วงบ่ายยังสามารถลดอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนให้ต่ำกว่าอากาศภายนอกได้อีกด้วย

ผลการทดสอบนี้พบว่า การใช้ระบบพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงควรทำร่วมกับระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ โดยในช่วงเช้าการระบายอากาศออกจากโรงเรือนเพื่อลดอิทธิพลของสภาวะเรือนกระจกลงให้น้อยที่สุดมีผลต่อการลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ดีกว่าการพ่นหมอก และในช่วงบ่ายการใช้ระบบพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิร่วมกับการระบายอากาศจะทำให้โรงเรือนมีความสามารถในการลดอุณหภูมิได้สูงสุดตลอดทั้งวัน

3.2 ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้

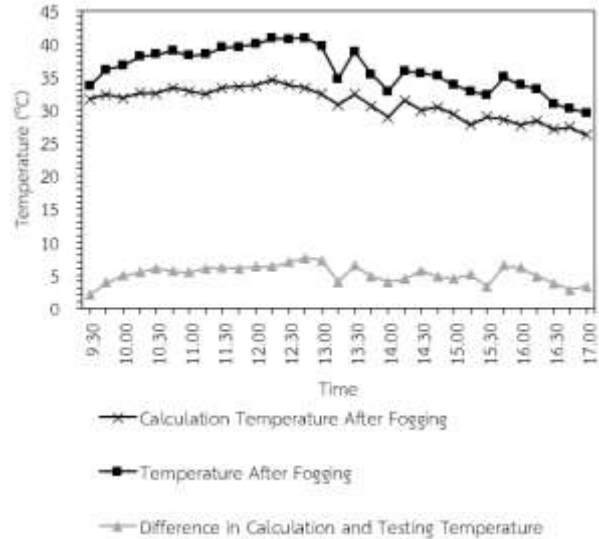


Figure 9. Relative Temperature during the day.

จาก Fig. 9 พบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนที่คำนวณได้จากสมการควบคุมกรณีละอองหมอกสามารถระเหยเป็นไอน้ำได้ทั้งหมด จะมีค่าระหว่าง 26.20°C – 34.49°C และมีค่าเฉลี่ย 30.92°C ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศหลังพ่นหมอกในโรงเรือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าระหว่าง 29.50°C – 40.90°C และมีค่าเฉลี่ย 36.07°C ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนกับอากาศที่คำนวณได้นี้มีค่าระหว่าง 1.98°C – 7.60°C มีค่าเฉลี่ย 5.51°C ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากละอองหมอกที่พ่นสู่อากาศไม่สามารถระเหยเป็นไอน้ำได้หมด 100% เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่เข้าสู่โรงเรือน ซึ่ง แนวโน้มของค่าความแตกต่างสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการพ่นหมอกใน Fig. 8

ในการประยุกต์ใช้ระบบนี้กับโรงเรือนเพาะปลูกจึงควรติดตั้งพัดลมภายในโรงเรือนเพื่อช่วยเพิ่มการหมุนเวียนอากาศให้ดีขึ้น เพื่อให้การระเหยละอองหมอกเป็นไอน้ำได้ดีและทำให้ค่าประสิทธิภาพการพ่นหมอกสูงขึ้น อุณหภูมิหลังการพ่นหมอกจึงจะมีค่าต่ำลงได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณยิ่งขึ้น

3.3 สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ

จาก Fig. 10 พบว่าสมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 2.72 – 19.00 มีค่าเฉลี่ย 9.27 โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าประสิทธิภาพการพ่นหมอก (Fig. 9) โดยที่ในช่วงเช้าเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิภายในโรงเรือนก่อนและหลังพ่นหมอกมีค่าที่ต่ำส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นมีค่าต่ำ และในช่วงบ่ายเมื่อผลต่างของอุณหภูมิภายในโรงเรือนก่อนและหลังพ่นหมอกมีค่าที่สูงขึ้นและส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

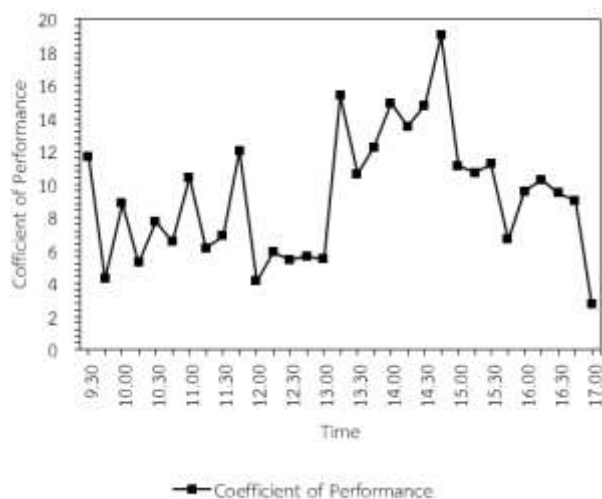


Figure 10. Coefficient of Performance during the day.

4 สรุป

การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งได้จากการทำสมดุลมวลสารของระบบโรงเรือนพ่นหมอกพบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 4.60°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนและประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่าระหว่าง 2.70% – 25.00% โดยมีค่าเฉลี่ย 11.61% และสมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 2.72 – 19.00 มีค่าเฉลี่ย 9.27 โดยมีความสิ้นเปลืองไฟฟ้าและน้ำเฉลี่ย $0.012 \text{ kWh day}^{-1}$ และ $1.88 \text{ kg}_{\text{water}} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ ในการพัฒนาระบบในอนาคตควรติดตั้งแผงแสงเพื่อลดปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เข้าโรงเรือนให้น้อยลงและใช้น้ำเย็นในการพ่นหมอกเพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนได้มากขึ้น และอาจปรับปรุงโปรแกรมให้สามารถตั้งค่าความชื้น (X_i) ได้ตามความต้องการของพืชได้ต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย BioSystem Engineering and Technology Research Laboratory และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Ghany, A.M., Kozai, T. 2006. Cooling Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses. *Biosystems Engineering*, 94(1), 97-109.
- Arbel A., A. Shklyar and M. Barak. 2000. Bouyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. *Acta Horticulturae*, 534, 327-334.
- ASHRAE. 2001. *ASHRAE Fundamentals Handbook* (SI). American Society of Heating Refrigerating & A-C Engineers.

- Hellickson M. A., Walker J. N. 1983. Ventilation of agricultural structures. ASAE monograph No. 6 American Society of Agricultural Engineers.
- Kittas C., Bartzanas, T., Jaffrin, A. 2001. Greenhouse evaporative cooling: measurement and data analysis. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 683-689.
- Ozturk, H.H. 2003. Evaporative Cooling Efficiency of a Fogging System for Greenhouses. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27, 49-57.
- Ozturk H. H., Bascetincelik, A. 2002. *Seralarda Havalandirma Turkiye Ziraat Odalan Birligi Yayinlari*. Ankara No: 227.
- Saowarat, C., Treeamnu, K., Treeamnu, T. 2018. Mathematical model for exact solution method of fogging process control in climate greenhouse system. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 6(1), 24 – 28.
- Stull, R. 2011. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. *American Meteorological Society*.