

การเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่โดยการ  
ทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกและท่อน้ำเย็น  
**Increase of Cooling Capacity of Strawberry Canopy by  
Evaporative Cooling Together with Air Flow Controlling  
Under Culture Bench and Cool Water Tube**

ภาณุวิชญ์ พุทธรักษา<sup>1</sup> และสุลักษณ์ มงคล<sup>1\*</sup>  
Panuwit Puttaraksa<sup>1</sup> and Sulaksana Mongkon<sup>1\*</sup>

Received: May 27, 2019; Revised: September 27, 2019; Accepted: October 4, 2019

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาการเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิทรงพุ่มของพืชในโรงเรือนสตรอว์เบอร์รี่ที่มีการใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกและท่อน้ำเย็น โรงเรือนกว้าง 6 m ยาว 24 m สูง 4.8 m หลังคาคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีนและผนังคลุมด้วยตาข่ายกันแมลง ผนังทิศเหนือติดแผ่นระเหยน้ำมีพื้นที่ 14.04 m<sup>2</sup> ภายในโรงเรือนมีรางปลูกกว้าง 0.3 m ยาว 21 m และสูง 1 m ใต้รางปลูกติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 50 W และติดตั้งพลาสติกครอบรางปลูกและเว้นช่องเปิดกว้าง 0.10 m ท่อน้ำเย็นทำจากอะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 cm ยาว 21 m จำนวน 1 กัลป์ ติดตั้งบนรางปลูกระหว่างทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ จากการศึกษาพบว่า การบังคับทิศทางอากาศสามารถลดอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มได้สูงสุด 5.5 °C เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการบังคับทิศทางอากาศ และพบว่าการใช้ท่อน้ำเย็นเพื่อการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มนั้นไม่มีผล จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า การเลือกใช้พัดลมที่มีความเร็วอากาศที่มากขึ้นร่วมกับการเพิ่มความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศร่วมกันจะสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้ประมาณ 4 - 5 °C และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้น 66.12 %

คำสำคัญ : การทำความเย็นแบบระเหย; สตรอว์เบอร์รี่; การบังคับทิศทางอากาศ; ท่อน้ำเย็น

<sup>1</sup> วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

<sup>1</sup> School of Renewable Energy, Maejo University

\* Corresponding Author E - mail Address: s\_mongkon@hotmail.com

## Abstract

This research aims to study the increase of cooling capacity for the nurture of canopy temperature in strawberry greenhouse that used evaporative cooling systems together with air flow controlling under the culture bench and cool water tube. The greenhouse had 6 m of width, 24 m of length and 4.8 m of height. The roof was covered by polyethylene plastic and insect screen net. On the north wall was installed the cooling pad of 14.04 m<sup>2</sup> area. Inside greenhouse had the culture bench that was 0.3 m of width, 21 m of length and 1 m of height. The 50 W of ventilation fans were install every the culture benches. The cool water tube made from aluminum with a diameter of 1.27 cm, length of 21 m and used one return coil between the strawberry bush. The results showed that the air flow controlling could decrease the air temperature around the plant canopy to a maximum of 5.5 °C when compared with non-air flow controlling, and the use of cool water tube could not effect of cooling. For the mathematical model study, it was found that using the faster velocity fan together with the opening width increasing of air flow controlling could reduce the strawberry canopy temperature about 4 - 5 °C and the coefficient of performance increased by 66.12 %.

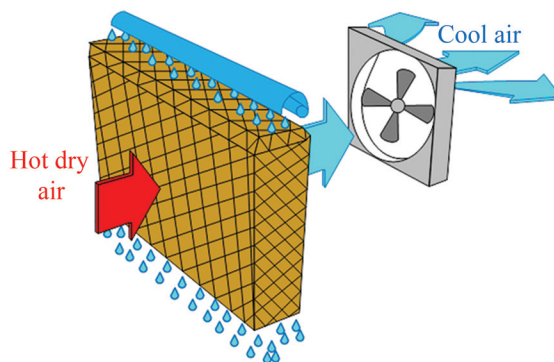
**Keywords:** Evaporative Cooling; Strawberry; Air Flow Controlling; Cool Water Tube

## บทนำ

ระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System) แบบใช้พัดลมร่วมกับแผ่นระเหยน้ำเป็นการทำความเย็นที่อาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศโดยอาศัยแผ่นระเหยน้ำที่เป็นวัสดุเปียกชุ่มด้วยน้ำเป็นตัวกลาง ดังรูปที่ 1 เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากอากาศที่ไหลผ่านแผ่นระเหยน้ำและมีความเท่ากับความร้อนแฝง (Latent Heat) การกลายเป็นไอน้ำจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอน้ำปะปนไปในอากาศ ทำให้ได้อากาศที่มีอุณหภูมิลดลงและความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นไปใช้งานหรืออากาศเย็นและชื้นนั่นเอง อากาศเย็นที่ได้สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงและมีความเหมาะสมกับการใช้งานระบบในสภาพอากาศเขตร้อน ทำให้เป็นที่นิยมใช้ในภาคเกษตรกรรม เช่น โรงเรือนปลูกพืช และโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น การทำความเย็นแบบระเหยแบบใช้พัดลมร่วมกับแผ่นระเหยน้ำจะมีการใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอหรือการใช้เครื่องปรับอากาศแบบทั่วไป จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of Performance: COP) สูงกว่าเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอทั่วไปประมาณ 7 - 10 เท่า [1] - [2]

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมีอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น Waewsak, J. et al. [3] ได้นำระบบทำความเย็นแบบระเหยขนาด 9 m<sup>2</sup> ไปใช้กับโรงเพาะเห็ดฟางพบว่า อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนเฉลี่ย 28.9 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 75 - 95 % ทำให้มีความเหมาะสมต่อการเพาะเห็ด

Mehmet, A. D. and Hasan, H. S. [4] ได้ศึกษาการทำความเย็นโดยใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยเพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนปลูกมะเขือเทศขนาด 36 m<sup>2</sup> ภายใต้สภาพอากาศชื้นและแห้งพบว่า สามารถลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้ตั้งแต่ 3 - 12 °C และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้ 10 - 38 % ทำให้สามารถเพาะปลูกพืชได้ดี Romantchik, E. et al. [5] ได้ศึกษาการใช้พลังงานในระบบทำความเย็นแบบระเหยในโรงเรือนปลูกพืชที่มีขนาดพื้นที่ 300 m<sup>2</sup> ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 30 °C พบว่า ระบบทำความเย็นแบบระเหยสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ถึง 19.2 °C และสามารถใช้ไฟฟ้าโดยตรงจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหย เช่น Hasan, O. Z. et al. [6] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหยในโรงเรือนปลูกมะเขือเทศพบว่า ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบระเหยเท่ากับ 80 % ทำให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ประมาณ 10 - 12 °C Poolkrajang, A. and Premjai, N. [7] ทำการสร้างและศึกษาประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบระเหยชนิดโดยตรงและโดยอ้อมพบว่า ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบโดยตรงรวมโดยอ้อมมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่ากับ 76.11 % และมีค่าอุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 25.88 °C



รูปที่ 1 หลักการทำงานของระบบ Fan-pad

จากข้อดีของระบบทำความเย็นแบบระเหยที่กล่าวมา ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยมาใช้ในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ โดยติดตั้งแผ่นระเหยน้ำร่วมกับการใช้พัดลมระบายอากาศได้รางปลูกที่มีอยู่เดิม ซึ่งจากการใช้งานพบว่า อากาศเย็นที่ผลิตได้จากระบบทำความเย็นแบบระเหยจะถูกพัดลมดูดให้ไหลอยู่เฉพาะบริเวณใต้รางปลูกไม่สัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่เท่าที่ควร จึงจำเป็นต้องหาวิธีการควบคุมอากาศเย็นที่ไหลอยู่ใต้รางปลูกให้สัมผัสกับทรงพุ่มต้นสตรอว์เบอร์รี่ให้มากขึ้น โดยต้องให้ได้ตามเงื่อนไขสภาพอากาศที่สตรอว์เบอร์รี่ต้องการคือ อุณหภูมิอากาศในตอนกลางวันต่ำกว่า 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 70 - 75 % ดังนั้นในการศึกษานี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงระบบทำความเย็นในโรงเรือนโดยเพิ่มการบังคับทิศทางอากาศให้สัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้มากที่สุด และใช้น้ำเย็นบริเวณรางปลูกเพื่อเสริมสมรรถนะการทำความเย็นให้แก่ทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ และได้ทำการศึกษาวารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นเพื่อหาแนวทางเพิ่มศักยภาพการทำความเย็น โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### สมรรถนะการทำความเย็น

ในการศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบระเหยแบ่งเป็นการวิเคราะห์ 2 ตัวแปร ได้แก่ ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย ( $\eta_{ECS}$ ) ขึ้นอยู่กับสถานะของอากาศที่ใกล้สภาวะอิ่มตัว พิจารณาผลของอุณหภูมิจากการระเหยของน้ำเมื่อมีอากาศไหลผ่านแผ่นระเหยน้ำได้จากสมการที่ (1) [8]

$$\eta_{ECS} = \frac{T_{db,i} - T_{db,o}}{T_{db,i} - T_{wb,i}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

$T_{db,i}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าระบบ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{db,o}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังออกจากระบบ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{wb,i}$	คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนเข้าระบบ ( $^{\circ}\text{C}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ (Coefficient of Performance:  $COP$ ) เป็นค่าบ่งบอกถึง ความสามารถในการทำความเย็นต่อการใช้พลังงานรวมของระบบทั้งหมด สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [7], [9]

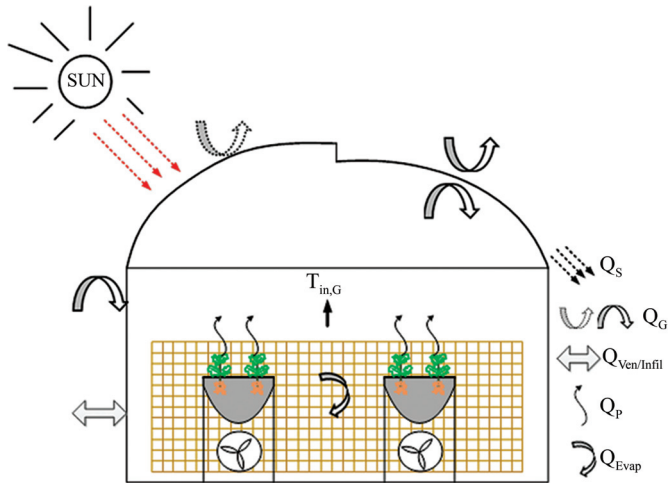
$$COP_{ECS} = \frac{Q_{evap}}{W_{net}} = \frac{\dot{m}_a (h_o - h_i)}{W_{net}} \quad (2)$$

โดยที่

$Q_{evap}$	คือ ความร้อนจากแผ่นระเหยน้ำ ( $W$ )
$W_{net}$	คือ กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ป้อนให้แก่ระบบ ( $W$ )
$\dot{m}_a$	คือ อัตราการไหลของอากาศ ( $\text{kg/s}$ )
$h_i$	คือ เอนทัลปีของอากาศก่อนผ่านแผ่นระเหยน้ำ ( $\text{J/kg}$ )
$h_o$	คือ เอนทัลปีของอากาศหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ ( $\text{J/kg}$ )

### สมดุลพลังงานในโรงเรือน

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เกิดขึ้น ในโรงเรือนที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหย จะอาศัยหลักการทำสมดุลพลังงาน (Energy Balance Method) ที่เกี่ยวข้องกับโรงเรือนดังรูปที่ 2 และสามารถเขียนเป็นสมดุลพลังงานดังสมการที่ (3) สำหรับ ความร้อนส่วนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโรงเรือนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) - (9)



รูปที่ 2 สมดุลพลังงานในโรงเรือน

$$\rho_{in,G} V_G C_{p,in,G} \frac{dT_{in,G}}{dt} = Q_S + Q_G + Q_{Ven/Infil} + Q_{Plant} + Q_{Evap} \quad (3)$$

โดยที่

$\rho_{in,G}$	คือ ความหนาแน่นอากาศในโรงเรือน ( $\text{kg/m}^3$ )
$V_G$	คือ ปริมาตรโรงเรือน ( $\text{m}^3$ )
$C_{p,in,G}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศในโรงเรือน ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ )
$T_{in,G}$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ( $^{\circ}\text{C}$ )
$Q_S$	คือ ความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W$ )
$Q_G$	คือ ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังและหลังคาโรงเรือนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W$ )
$Q_{Ven/Infil}$	คือ ความร้อนจากการระบายอากาศ ( $W$ )
$Q_{Plant}$	คือ ความร้อนจากการคายน้ำของพืช ( $W$ )
$Q_{Evap}$	คือ ความร้อนจากการทำความเย็นแบบระเหย ( $W$ )

ความร้อนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $Q_S$ ) เกิดจากความเข้มรังสีอาทิตย์จะกระทบบริเวณผนังและหลังคาโรงเรือน ทำให้ความร้อนสะสมในบริเวณดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) [10]

$$Q_S = \tau (\sum (I_{T,w} A_w) + \sum I_{T,r} A_r) \quad (4)$$

โดยที่

$A_w$	คือ พื้นที่ผนังของโรงเรือน ( $\text{m}^2$ )
$A_r$	คือ พื้นที่หลังคาของโรงเรือน ( $\text{m}^2$ )

$I_{T,w}$	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังโรงเรือนแต่ละด้าน ( $W/m^2$ )
$I_{T,r}$	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคาโรงเรือนแต่ละด้าน ( $W/m^2$ )
$\tau$	คือ Transmissivity

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังและหลังคาโรงเรือนจากความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $Q_G$ ) หาได้จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient: U) เนื่องจากหลังคาโรงเรือนที่ใช้ในการวิจัยคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีน ผนังส่วนใหญ่คลุมด้วยตาข่ายกันแมลง ทำให้อากาศภายในและภายนอกโรงเรือนเกิดการถ่ายเทความร้อนตลอดเวลา การทำสมดุลพลังงานของผนังแต่ละด้านนั้นจึงเป็นไปได้ยาก อีกทั้งโรงเรือนใช้พลาสติกคลุมเพียงแค่หลังคา ผนังส่วนใหญ่คลุมด้วยตาข่ายกันแมลงจึงไม่คิดการแผ่รังสีระหว่างหลังคากับผนัง ความร้อนจากการถ่ายเทผ่านโรงเรือนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$Q_G = U_{G,Avg} A_G (T_{in,G} - T_{o,G}) \quad (5)$$

โดยที่

$Q_G$	คือ ความร้อนจากผนังและหลังคาโรงเรือน (W)
$U_{G,Avg}$	คือ ค่า U เฉลี่ยของโรงเรือนที่ใช้ทดสอบ ( $W/m^2 \cdot K$ )
$A_G$	คือ พื้นที่ผนังและหลังคาโรงเรือนทั้งหมด ( $m^2$ )
$T_{o,G}$	คือ อุณหภูมิอากาศนอกโรงเรือน ( $^{\circ}C$ )

ความร้อนจากการระบายอากาศ ( $Q_{Ven/Infil}$ ) เกิดจากช่องตาข่ายของผนังโรงเรือนสามารถช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากโรงเรือนได้ ขึ้นอยู่กับอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ โดยที่  $N$  มีหน่วยเป็น ( $s^{-1}$ ) ในโรงเรือนตามจำนวนเท่าของปริมาตรของห้อง (Air Change Per Hour) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) [11]

$$Q_{Ven/Infil} = 0.5NC_{p,a}\rho_a(T_{o,G} - T_{in,G}) \quad (6)$$

ความร้อนจากการคายน้ำของพืช ( $Q_p$ ) เกิดจากพืชที่ปลูกในโรงเรือนจะมีการหายใจและการระเหยน้ำของใบพืชสู่บรรยากาศในโรงเรือน ในการศึกษาตั้งสมมติฐานว่า การหายใจของพืชมีค่าเท่ากันและไม่มี การแบ่งตัวเป็นชั้น และกำหนดให้สมบัติทางความร้อนของพืชเท่ากับสมบัติทางความร้อนของน้ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) [12]

$$Q_p = \frac{M_T \left( h_{w25} + C_{p,w} \frac{(T_{in,G} + T_p)}{2} \right)}{2A_p} \quad (7)$$

$$M_T = \frac{2A_p \rho_p (\omega_p - \omega_{in,G})}{R_p} \quad (8)$$

โดยที่

$M_T$	คือ อัตราการถ่ายเทความชื้น (kg/s)
$h_{w25}$	คือ เอนทัลปีของน้ำที่ 25 °C (J/kg)
$C_{p,w}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของพีชที่ความดันคงที่ (J/kg·K)
$T_p$	คือ อุณหภูมิของพีช (K)
$A_p$	คือ พื้นที่ปลูกพีช (m <sup>2</sup> )
$\rho_p$	คือ ความหนาแน่นของพีช (kg/m <sup>3</sup> )
$\omega_p$	คือ อัตราส่วนความชื้นอิมตัวของอากาศที่อุณหภูมิพีช (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )
$\omega_{in,G}$	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโรงเรือน (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )
$R_p$	คือ ความต้านทานการคายน้ำของพีช (s/m)

สำหรับความร้อนจากระบบทำความเย็นแบบระเหย ( $Q_{Evap}$ ) มีหน่วยเป็น (W) เกิดจากผลรวมระหว่างความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอากาศ สามารถหาได้จากสมการที่ (9) [13] - [14]

$$Q_{Evap} = \dot{m}_a (h_{da,o} + \omega_o h_{fg,o}) - \dot{m}_a (h_{da,i} + \omega_i h_{fg,i}) - \dot{m}_a (\omega_o - \omega_i) h_w \quad (9)$$

โดยที่

$\dot{m}_a$	คือ อัตราการไหลของอากาศแห้ง (kg/s)
$\dot{m}_w$	คือ อัตราการไหลของน้ำที่แผ่นระเหยน้ำ (kg <sub>w</sub> /s)
$h_{da,i}$	คือ เอนทัลปีอากาศแห้งก่อนผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_{da,o}$	คือ เอนทัลปีอากาศแห้งหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_{fg,i}$	คือ เอนทัลปีอากาศชื้นก่อนผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_{fg,o}$	คือ เอนทัลปีอากาศชื้นหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$h_w$	คือ เอนทัลปีของน้ำที่แผ่นระเหยน้ำ (J/kg)
$\omega_i$	คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศที่เข้าระบบ (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )
$\omega_o$	คือ อัตราส่วนความชื้นอากาศที่ออกระบบ (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )

จากสมการพลังงานในสมการที่ (3) สามารถจัดพจน์ใหม่เพื่อหาอุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ณ เวลาใด ๆ ในรูปของสมการเชิงตัวเลขแบบสืบเนื่อง (Finite Difference Method) ได้ดังสมการที่ (10) และแทนค่าความร้อนต่าง ๆ จะสามารถทำนายอุณหภูมิอากาศ ณ เวลาถัดไปได้

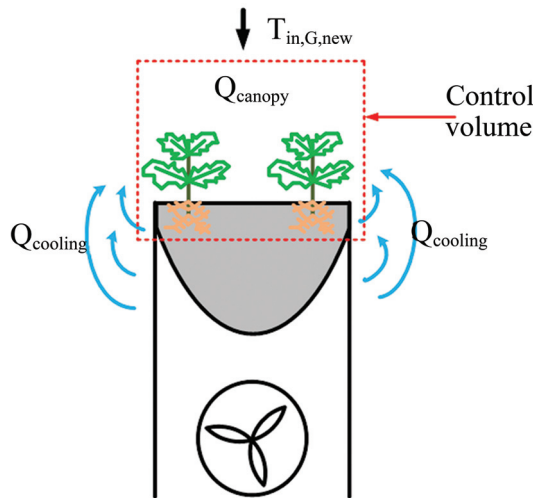
$$T_{in,G}^{t+\Delta t} = T_{in,G}^t + \frac{Q_S + Q_G + Q_{Ven/Infil} + Q_{Plant} + Q_{Evap}}{\rho_{in,G} V_G C_{p,in,G}} \Delta t \quad (10)$$

โดยที่

$T_{in,G}^t$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่เวลาเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{in,G}^{t+\Delta t}$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่เวลาถัดไป ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta t$	คือ เวลา (s)

### สมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี

สำหรับการทำสมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีอากาศในโรงเรือนจะถ่ายเทความร้อนให้แก่ทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี โดยตั้งสมมติฐานว่า อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้จากแบบจำลอง ( $T_{in,G,new}$ ) เท่ากับอุณหภูมิอากาศเหนือทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี และคิดการระบายอากาศกรณีที่ทรงพุ่มได้รับความเย็นจากระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี

จากรูปที่ 3 สามารถเขียนสมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีได้ดังสมการที่ (11) - (14)

$$\rho_{a,c} V_{c,b} C_{p,c} \frac{dT_c}{dt} = Q_{Cooling} + Q_{Cooling,tube} \quad (11)$$

$$Q_{Cooling} = \dot{m}_{o,vent} C_{p,a} (T_{o,vent} - T_{in,G,new}) \quad (12)$$

$$Q_{Cooling,tube} = h_r A_{tube} (T_{tube} - T_{in,G,new}) \quad (13)$$

$$T_{canopy}^{t+\Delta t} = T_{canopy}^t + \left[ \frac{(Q_{Cooling} + Q_{Cooling,tube}) \Delta t}{\rho_{a,c} C_{p,a} V_{c,b}} \right] \quad (14)$$

โดยที่

$A_{tub}$	คือ พื้นที่ผิวท่อน้ำเย็น ( $m^2$ )
$C_{p,a}$	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี ( $J/kg \cdot K$ )
$h_r$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของท่อน้ำเย็น ( $W/m^2 \cdot K$ )
$\dot{m}_{o,vent}$	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ( $kg/s$ )
$T_{o,vent}$	คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ( $^{\circ}C$ )
$T_{tube}$	คือ อุณหภูมิอากาศผิวท่อน้ำเย็น ( $^{\circ}C$ )
$T_{canopy}^{t+\Delta t}$	คือ อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีที่เวลาเปลี่ยนไป ( $^{\circ}C$ )
$T_{canopy}^t$	คือ อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีที่เวลาเริ่มต้น ( $^{\circ}C$ )
$T_{o,vent}$	คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ( $^{\circ}C$ )
$T_{in,G,new}$	คือ อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้จากแบบจำลอง ( $^{\circ}C$ )
$V_{c,b}$	คือ ปริมาตรบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี ( $m^3$ )
$Q_{Cooling,tube}$	คือ ความสามารถในการทำความเย็นของระบบท่อน้ำเย็น ( $W$ )
$\rho_{a,c}$	คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้งบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี ( $kg/m^3$ )

### สมดุลความชื้นของอากาศ

การวิเคราะห์สมดุลความชื้นสามารถหาได้จากการทำสมดุลมวลและสมดุลมวลอากาศชื้น พิจารณาได้จากกระบวนการผสมอากาศที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ มวลอากาศเดิมที่อยู่บริเวณทำการศึกษากับมวลอากาศที่ออกจากระบบ ผสมกันเป็นมวลอากาศใหม่ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (15) - (17) [15]

สมดุลมวล

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_{new} \tag{5}$$

สมดุลมวลอากาศชื้น

$$\dot{m}_1 \omega_1 + \dot{m}_2 \omega_2 = \dot{m}_{new} \omega_{new} \tag{6}$$

สมการสมดุลความชื้น

$$RH_{new} = \frac{\omega_{new} P_{atm}}{(0.622 + \omega_{new}) P_{vs,T(simulation)}} \tag{7}$$

โดยที่

$\dot{m}_1$	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ออกจากระบบ ( $kg/s$ )
$\dot{m}_2$	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่อยู่บริเวณทำการศึกษาคือ ( $kg/s$ )

$\dot{m}_{new}$	คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศใหม่ที่ผสมระหว่างที่ออกจากระบบ กับที่อยู่บริเวณทำการศึกษ (kg/s)
$P_{atm}$	คือ ความดันบรรยากาศ (kPa)
$P_{vs,T(simulation)}$	คือ ความดันไออิ่มตัว (kPa)
$\omega_1$	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากระบบ (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )
$\omega_2$	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่อยู่บริเวณทำการศึกษ (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )
$\omega_{new}$	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ผสมระหว่างที่ออกจากระบบกับ ที่อยู่บริเวณทำการศึกษ (kg <sub>w</sub> /kg <sub>da</sub> )

## วิธีดำเนินการวิจัย

### โรงเรือนและระบบทำความเย็น

การศึกษาระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกและร่วมกับการใช้ท่อน้ำเย็นบริเวณรางปลูกสตอร์วเบอร์รี่ได้ทำการทดสอบ ณ โรงเรือนของคณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ เป็นโรงเรือนหลังคาโค้งคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีน พรางคลุมด้วยตาข่ายกันแมลง กว้าง 6 m ยาว 24 m สูง 4.8 m มีช่องระบายอากาศด้านบนหลังคากว้าง 0.3 m ภายในโรงเรือนมีรางปลูกสตอร์วเบอร์รี่ขนาดกว้าง 0.3 m ยาว 21 m และสูง 1 m จำนวน 5 ราง ด้านล่างของแต่ละรางปลูกติดตั้งพัดลมระบายอากาศชนิด Axial Fan ขนาด 50 W และติดตั้งระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative Cooling System, ECS) ประกอบด้วย แผ่นระเหยน้ำชนิดเซลลูโลส พื้นที่หน้าตัด 14.04 m<sup>2</sup> ปั้มน้ำขนาด 373 W และถังน้ำขนาด 540 Liter ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) สำหรับการบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกสตอร์วเบอร์รี่นั้นได้ติดตั้งพลาสติกครอบรางปลูก หรือเรียกว่า Skirt Plastic (SP) โดยเว้นช่องว่างขนาด 0.10 m ให้อากาศใต้รางปลูกไหลขึ้นมาสัมผัสกับทรงพุ่มสตอร์วเบอร์รี่ และใช้ท่อน้ำเย็น (Cooling Tube, CT) ติดตั้งภายในรางปลูกบริเวณทรงพุ่มสตอร์วเบอร์รี่ ดังรูปที่ 4(ค) และ 4(ง) ท่อน้ำเย็นทำจากท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 cm ยาว 21 m วางไว้บนรางปลูกจำนวน 1 กลับ ใช้ปั้มน้ำขนาด 373 W สูบน้ำจากถังน้ำขนาด 70 Liter ซึ่งเป็นน้ำเย็นที่ได้จากระบบทำความเย็นแบบระเหยผ่านท่ออะลูมิเนียม



(ก) ระบบทำความเย็นแบบระเหย



(ข) พัดลมระบายอากาศ

### รูปที่ 4 ส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบระเหย



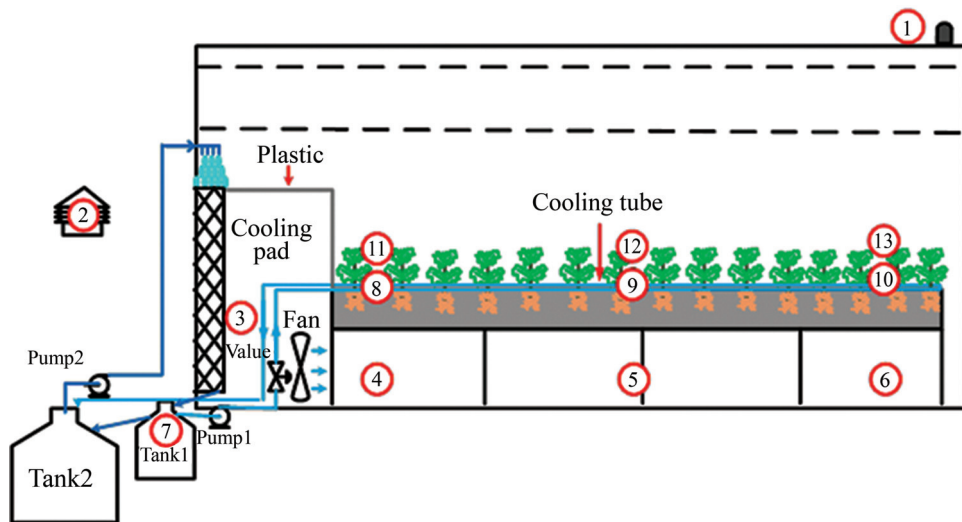
(ค) การบังคับทิศทางอากาศ



(ง) ท่อน้ำเย็น

รูปที่ 4 ส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบระเหย (ต่อ)

การทำงานของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 5 เริ่มจากปั้มน้ำตัวที่ 2 สูบน้ำจากถังที่ 2 ปล่ยผ่านแผ่นระเหยน้ำจนเปียกชุ่ม พัดลมระบายอากาศใต้รางปลูกดูอากาศแวดล้อมบริเวณภายนอกโรงเรือนที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำผ่านแผ่นระเหยน้ำ ได้อากาศเย็นและชื้นสะสมอยู่บริเวณห้องกักเก็บอากาศหน้าแผ่นระเหยน้ำไหลก่อนไหลเข้าสู่ระบบบังคับทิศทางอากาศ สำหรับน้ำที่ผ่านแผ่นระเหยน้ำแล้วจะมีอุณหภูมิลดลงจึงปล่อยลงสู่ถังน้ำที่ 1 และใช้ปั้มน้ำจากถังที่ 1 ไปหมุนเวียนในท่ออะลูมิเนียมที่ติดตั้งไว้บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ตลอดความยาวรางปลูก เมื่อน้ำไหลจนครบรอบรางปลูกแล้วจะไหลเวียนกลับลงถังน้ำที่ 2



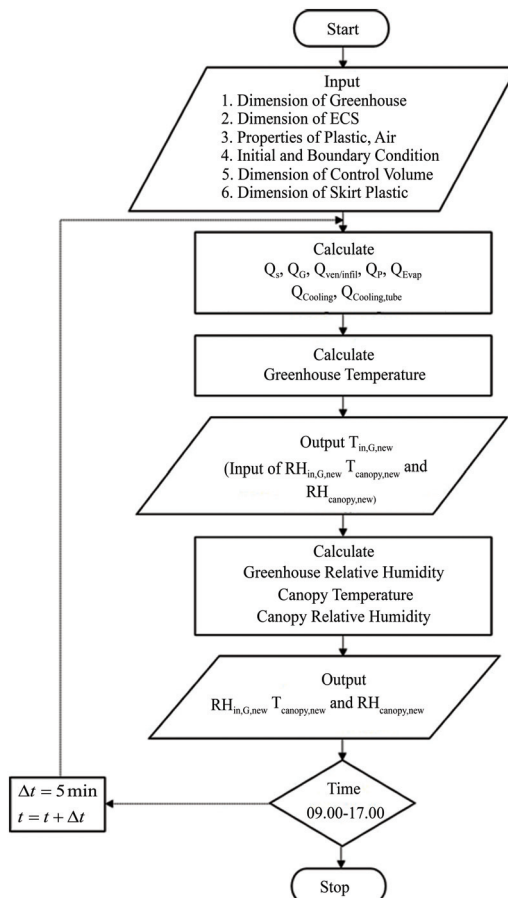
รูปที่ 5 หลักการทำงานของระบบทำความเย็น

สำหรับกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กรณีทดสอบกับรางปลูก 3 ราง ได้แก่ กรณีที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศ (ECS+SP) กรณีที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศและท่อน้ำเย็น (ECS+SP+CT) และกรณีที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยเพียงอย่างเดียว (ECS) ในการเก็บข้อมูลทำการวัดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 5 ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์บริเวณตำแหน่งสูงสุดของหลังคาโรงเรือน (จุดที่ 1) โดยใช้ Pyranometer (ยี่ห้อ Apogee, Resolution  $\pm 1 \text{ W/m}^2$ )

ทำการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (จุดที่ 2) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังผ่านแผ่นระเหยน้ำ (จุดที่ 3) และอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณใต้รางปลูกที่ระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำ 2 m, 12 m, และ 22 m สูงจากพื้นโรงเรือน 0.3 m (จุดที่ 4-6) โดยใช้ Temp & RH Data Logger (ยี่ห้อ TENMARS, Resolution  $\pm 0.1$  °C and  $\pm 0.1$  %RH) วัดอุณหภูมิผิวท่อและน้ำในถังที่ 1 (จุดที่ 7 - 10) วัดอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ (จุดที่ 11 - 13) โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล (Type K) เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล TSUS/Ez Data Logger ทำการวัดความเร็วอากาศ (จุดที่ 3 - 6) ใช้ Hot-Wire Anemometer (ยี่ห้อ TENMARS, Resolution  $\pm 0.1$  m/s) ทำการบันทึกข้อมูลการทดลองทุก ๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 09.00 - 17.00 น.

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2013 วิธีการคำนวณใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสลับเนื่อง (Finite Difference Method) แบบวิธีชัดแจ้ง (Explicit Method) และกำหนดสมมติฐานว่าเป็นกระบวนการอยู่ในสภาวะกึ่งคงที่ (Quasi-Steady State) เพื่อทำนายอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนและอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ในรูปที่ 6



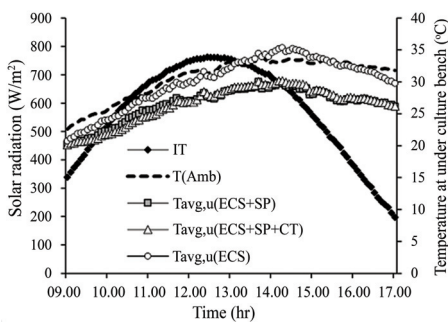
รูปที่ 6 แผนผังการคำนวณของแบบจำลองคณิตศาสตร์

ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เริ่มด้วยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและค่าคงที่ต่าง ๆ การคำนวณภาระความร้อนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในโรงเรือน การคำนวณหาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่ม ค่าอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่คำนวณได้จากแบบจำลองจะใช้เป็นตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทรงพุ่ม โดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศในโรงเรือนเท่ากับอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มเริ่มต้นของการคำนวณ ณ เวลาถัดไป สำหรับการคำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มใช้หลักการของกระบวนการผสมอากาศระหว่างมวลอากาศที่ออกจากช่องอากาศของระบบบังคับทิศทางอากาศกับมวลอากาศเดิมที่อยู่บริเวณทรงพุ่มที่รวมกันเป็นมวลอากาศใหม่บริเวณทรงพุ่ม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำการคำนวณทุก ๆ 5 นาที ตั้งแต่ 09.00 - 17.00 น.

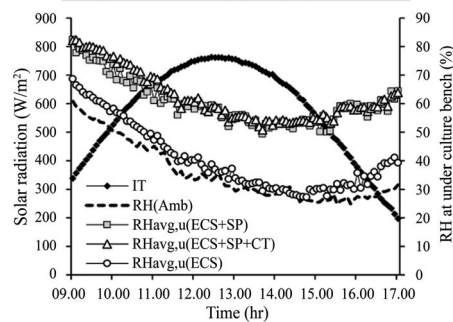
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### ศักยภาพการทำความเย็นของระบบทำความเย็น

จากการทดสอบระบบทำความเย็นแบบระเหยที่ใช้ร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศและท่อน้ำเย็นในแต่ละกรณีภายในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ ทำการทดสอบวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2561 ซึ่งเป็นวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์แปรผันตั้งแต่ 197.2 - 762.3 W/m<sup>2</sup> ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมแปรผันตั้งแต่ 22.6 - 33.9 °C และ 24.80 - 60.8 % ตามลำดับ



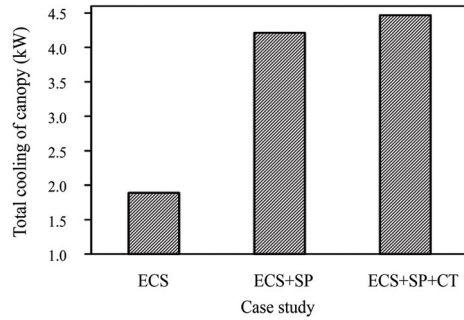
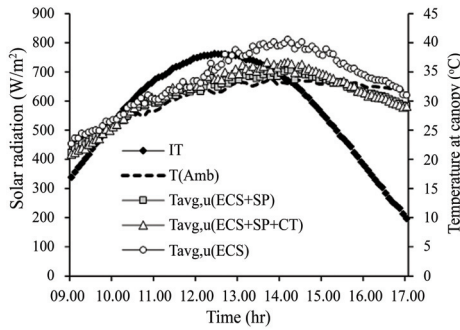
(ก) อุณหภูมิอากาศ



(ข) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงอากาศบริเวณใต้รางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ในกรณีต่าง ๆ

ในรูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณใต้รางปลูกสตรอว์เบอร์รี่ของทั้ง 3 กรณี พบว่า อุณหภูมิอากาศในทุก ๆ กรณีรวมทั้งอากาศแวดล้อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแปรผกผันกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศ โดยกรณี ECS+SP และ ECS+SP+CT มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศใต้รางปลูกเฉลี่ยตลอดความยาวรางใกล้เคียงกันมีค่าตั้งแต่ 20.1 - 30.2 °C และ 50.0 - 82.4 % ตามลำดับ ขณะที่กรณี ECS มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแปรผันระหว่าง 20.7 - 35.4 °C และ 27.2 - 68.6 % ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษพบว่า การบังคับทิศทางอากาศใต้รางปลูกของกรณีการใช้ ECS+SP และ ECS+SP+CT สามารถเพิ่มความเร็วอากาศใต้รางปลูกได้ จึงทำให้พาอากาศที่ผลิตจากระบบทำความเย็นแบบระเหยได้เร็วกว่ากรณีไม่มีการบังคับทิศทางอากาศ (ECS) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วอากาศตลอดความยาวรางที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.25 m/s



(ก) อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี (ข) ความสามารถในการทำความเย็น  
รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีและความสามารถในการทำความเย็น  
ของระบบในกรณีต่าง ๆ

ในรูปที่ 8(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีของกรณีต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอากาศของทั้ง 3 กรณี มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเหมือนกับอากาศได้รางปลูก แต่จะมีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากแนวการเคลื่อนตัวของอากาศเย็นจากแผ่นระเหยน้ำส่วนใหญ่อยู่ในแนวระนาบ ได้รางปลูกมากกว่าทรงพุ่ม และเมื่อวิเคราะห์ที่อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มของทั้ง 3 กรณี พบว่าในช่วงเวลา 09.00 - 12.10 น. บริเวณทรงพุ่มของกรณี ECS+SP และใช้ ECS+SP+CT ได้รับค่ารังสีอาทิตย์มากกว่า กรณีการใช้ ECS ที่รางปลูกถูกบังเงาจากโครงสร้างโรงเรือน จึงทำให้อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่ม ทุกกรณีในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน และในช่วงเวลา 12.10 - 17.00 น. อุณหภูมิอากาศบริเวณ ทรงพุ่มของกรณี ECS+SP และกรณี ECS+SP+CT มีค่าต่ำกว่ากรณี ECS ตั้งแต่ 1.1 - 5.5 °C เนื่องจากช่วงบ่ายบริเวณทรงพุ่มของทั้ง 3 กรณีได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม กรณี ECS+SP และกรณี ECS+SP+CT มีความเร็วอากาศบริเวณทรงพุ่มสูงกว่าจึงทำให้ได้รับอากาศเย็น จากแผ่นระเหยน้ำได้เร็วกว่ากรณีการใช้ ECS สำหรับการใช้น้ำเย็นเพื่อเพิ่มศักยภาพการทำความเย็น บริเวณทรงพุ่ม ผลการศึกษาพบว่า แทบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอากาศบริเวณทรงพุ่ม ซึ่งสามารถ อธิบายได้จากค่าความสามารถในการทำความเย็น (Cooling Capacity) ของระบบทำความเย็นตลอดทั้งวัน ในแต่ละกรณีดังรูปที่ 8(ข) พบว่า กรณี ECS กรณี ECS+SP และกรณี ECS+SP+CT มีค่าความสามารถ ในการทำความเย็นเท่ากับ 1.89 4.21 และ 4.47 kW ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่ากรณีที่มีการใช้ระบบทำความเย็น แบบระเหยเพียงอย่างเดียว (ECS) ค่าความสามารถในการทำความเย็นมีค่าต่ำสุด และเมื่อนำกรณีการบังคับ ทิศทางอากาศ (ECS+SP) มาเปรียบเทียบกับกรณีการบังคับทิศทางอากาศเสริมท่อน้ำเย็น (ECS+SP+CT) พบว่า มีผลต่างกันน้อยมากโดยมีค่าผลต่างเท่ากับ 0.26 kW หรือคิดเป็น 5.81 % ดังนั้นความเย็นที่แผ่ออกมา จากท่อน้ำเย็นอาจไม่สามารถลดอุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มได้ และศักยภาพการทำความเย็นส่วนใหญ่ มาจากการใช้ระบบบังคับทิศทางอากาศ ข้อสังเกตที่ได้จากการศึกษาพบว่า หากต้องการใช้น้ำเย็น เพื่อช่วยเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นให้มากขึ้นควรมีการเปลี่ยนตำแหน่งการวางจากที่ติดตั้งระหว่าง ทรงพุ่มในรางปลูกสตรอว์เบอร์รี เปลี่ยนมาติดตั้งไว้บริเวณทรงพุ่มด้านข้างรางปลูกเนื่องจากอากาศของ ระบบบังคับทิศทางอากาศด้วย Skirt Plastic จะไหลออกมาสัมผัสกับท่อน้ำเย็นทำให้อุณหภูมิอากาศมีค่า ลดลงก่อนที่จะสัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

Case Study	$COP_{cooling}$
แบบระเหยเพียงอย่างเดียว (ECS)	4.48
แบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศ (ECS+SP)	9.96
แบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศและท่อน้ำเย็น (ECS+SP+CT)	7.17

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ หรือค่า  $COP_{cooling}$  ของทั้ง 3 กรณี ดังตารางที่ 1 พบว่า ค่า  $COP_{cooling}$  จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำความเย็นของระบบและพลังงานสุทธิที่ป้อนให้แก่ระบบ โดยกรณี ECS+SP มีค่า  $COP_{cooling}$  สูงสุดลำดับต่อมาได้แก่ กรณี ECS+SP+CT และกรณี ECS ตามลำดับ แม้ว่ากรณี ECS+SP กับกรณี ECS+SP+CT มีความสามารถในการทำความเย็นใกล้เคียงกัน แต่ค่า  $COP_{cooling}$  มีค่าต่างกัน 2.8 เนื่องจากกรณีการใช้ ECS+SP+CT มีการใช้ปั๊มน้ำสำหรับหมุนเวียนในท่อน้ำเย็นทำให้ต้องใช้พลังงานในการขับปั๊มจึงมีค่าพลังงานสุทธิที่ใช้ในระบบมากกว่ากรณี ECS+SP

#### ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้เลือกผลการทดลองในวันที่ 4 มีนาคม 2561 ซึ่งเป็นวันที่มีสภาพอากาศทั่วไปท้องฟ้าโปร่ง มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์แปรผันตั้งแต่ 210.85 - 833.9 W/m<sup>2</sup> อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมมีค่าตั้งแต่ 25 - 35.4 °C และ 18.3 - 51 % ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

Item	Relative Error	RMSE
อุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ( $T_{in,G}$ )	1.69 %	0.71
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือน ( $RH_{in,G}$ )	2.84 %	1.11
อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ ( $T_{canopy}$ )	4.06 %	1.58
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ ( $RH_{canopy}$ )	6.14 %	2.89

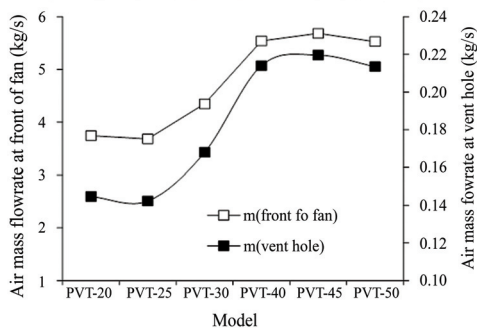
จากตารางที่ 2 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือน โดยใช้ผลจากการทำนายเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 1.69 % และ 2.84 % ตามลำดับ สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ พบว่าค่าอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.06 % และ 6.14 % ตามลำดับ ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าอุณหภูมิอากาศเนื่องจากใช้ค่าอุณหภูมิอากาศที่ได้จากการทำนายอากาศในโรงเรือนเป็นตัวแปรเริ่มต้นในการคำนวณสมดุลพลังงานบริเวณทรงพุ่ม สำหรับการวิเคราะห์ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ พบว่าหากค่า RMSE ที่ได้มีค่าน้อยแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

มีความถูกต้องและแม่นยำ [16] ซึ่งค่าจากการทำนายอุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ( $T_{in,G}$ ) มีความคลาดเคลื่อนน้อยสุด สำหรับค่า RMSE ของความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือน ( $RH_{in,G}$ ) อุณหภูมิอากาศบริเวณทรงพุ่ม ( $T_{canopy,b}$ ) และความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่ม ( $RH_{canopy,b}$ ) มีค่า RMSE สูงกว่า เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวใช้ค่าอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้จากการทำนาย ( $T_{in,G}$ ) เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอยู่แล้วทำให้ข้อมูลแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเพิ่มขึ้นได้

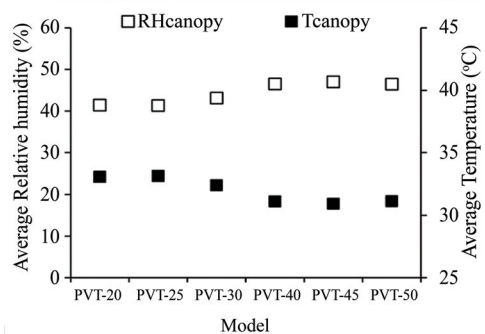
### การศึกษาพารามิเตอร์เพื่อหาแนวทางเพิ่มศักยภาพการทำความเย็น

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ทำให้ทราบว่า ศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่ม ได้แก่ ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ และความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ ได้เลือกใช้พัดลมระบายอากาศที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและเป็นชนิดเดียวกันกับใช้ในโรงเรือนปลูกสตรอว์เบอร์รี่ โดยเลือกพัดลมระบายอากาศรุ่นท่อ PVT ชนิด Axial Fan [17] ทั้งหมด 6 รุ่น ได้แก่ PVT-20 PVT-25 PVT-30 PVT-40 PVT-45 และ PVT-50 ซึ่งพัดลมระบายอากาศแต่ละรุ่นให้ความเร็วอากาศบริเวณหน้าพัดลมเท่ากับ 11.14 10.96 12.94 16.49 16.92 และ 16.45 m/s ตามลำดับ และส่งผลให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศบริเวณช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศค่าแตกต่างกันด้วย

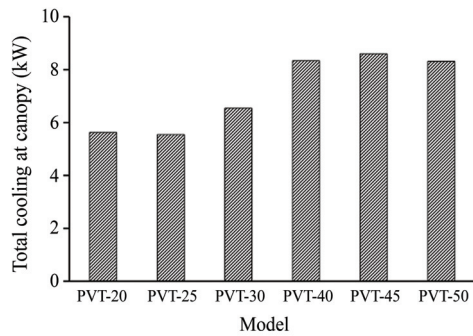


(ก) อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ  
ของพัดลมแต่ละรุ่น



(ข) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเฉลี่ย  
บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่

รูปที่ 9 ผลการศึกษาความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ

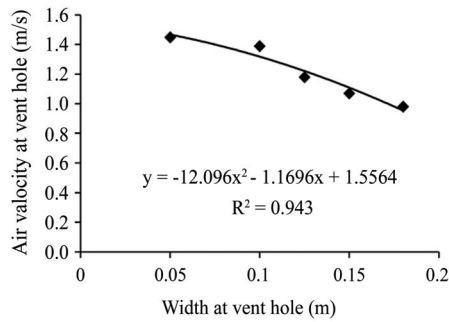


(ค) ผลรวมค่าความสามารถในการทำความเย็นต่อวัน

## รูปที่ 9 ผลการศึกษาความเร็วอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศ (ต่อ)

จากรูปที่ 9 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการเลือกใช้พัดลมระบายอากาศทั้ง 6 รุ่น พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดแปรผันตามกับความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9(ก) และเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ดังรูปที่ 9(ข) พบว่า อุณหภูมิอากาศมีค่าลดลงและความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น สามารถลดอุณหภูมิอากาศได้สูงสุด 3 °C และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงสุด 8 % เมื่อเลือกใช้พัดลมรุ่น PVT-40 PVT-45 และ PVT-50 เนื่องจากพัดลมดังกล่าวมีความเร็วอากาศที่สูงที่สุดทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ออกจากช่องเปิดที่สูงกว่ารุ่นอื่น ๆ ทำให้อากาศที่อยู่บริเวณใต้รางปลูกสามารถไหลออกมาสัมผัสกับทรงพุ่มได้ อีกทั้งค่าความสามารถในการทำความเย็นที่ระบบทำได้ต่อหนึ่งวันมีค่ามากกว่าการใช้พัดลมรุ่นอื่น ๆ ประมาณ 8.2 - 8.5 kW อย่างไรก็ตามควรเลือกใช้พัดลมระบายอากาศรุ่น PVT-40 เนื่องจากมีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับพัดลมเดิมที่ใช้ในโรงเรือนทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้มีค่าน้อยกว่ารุ่น PVT-45 และ PVT-50

สำหรับการศึกษาความกว้างของช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศซึ่งเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ เนื่องจากหากช่องเปิดมีความกว้างเพิ่มขึ้น อากาศใต้รางปลูกสามารถไหลออกมาสัมผัสกับทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้มากขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษารับความกว้างช่องเปิดให้มีขนาด 0.05 0.075 0.1 0.125 0.15 0.175 และ 0.2 m ตามลำดับ แต่จากการทดสอบพบว่า เมื่อความกว้างของช่องเปิดมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดมีค่าเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นจึงทำการหาความเร็วของอากาศที่ความกว้างของช่องเปิดขนาดต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10

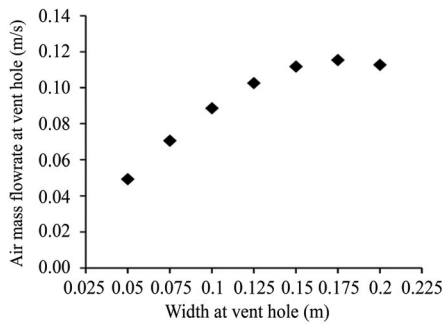


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ

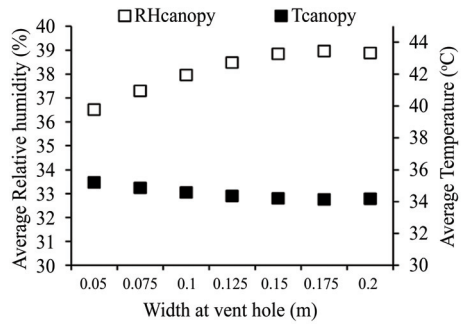
จากรูปที่ 10 พบว่า ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดแปรผกผันกับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ และสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศกับความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิด ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำนายความเร็วอากาศที่ช่องเปิดขนาดอื่น ๆ ได้ ดังสมการที่ (18)

$$v_{o,vent} = -12.09w_{o,vent}^2 - 1.1696w_{o,vent} + 1.5564 \quad (18)$$

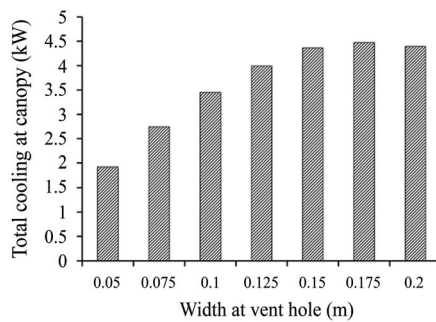
ในการศึกษาศักยภาพของระบบบังคับทิศทางอากาศในกรณีการปรับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศได้กำหนดให้ใช้พัดลมอากาศตัวเดิมที่ติดตั้งไว้ใต้รางปลูกสตรอว์เบอร์รี่มีความเร็วอากาศหน้าพัดลม 7.3 m/s และเลือกระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำ 12 m ที่เป็นจุดกำหนดขอบเขตของระบบเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ และกำหนดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศที่ออกจากช่องเปิด จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลออกจากระบบบังคับทิศทางอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่ช่องเปิดกว้าง 0.175 m ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (18) ดังรูปที่ 11(ก) และเมื่อวิเคราะห์ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ดังรูปที่ 11(ข) พบว่า อุณหภูมิอากาศมีค่าลดลงและความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งและเริ่มลดลงดังรูปที่ 11(ค) จากการวิเคราะห์สาเหตุพบว่า ถึงแม้จะให้ความกว้างช่องเปิดเพิ่มขึ้นอากาศเย็นจากใต้รางปลูกที่ผลิตจากระบบทำความเย็นแบบระเหยสามารถไหลออกมาสัมผัสกับทรงพุ่มได้มาก แต่หากมากเกินไปจนเกินค่าที่เหมาะสม ความเร็วอากาศที่ไหลออกจากช่องเปิดจะมีค่าลดลงจนทำให้ผลรวมของค่าความสามารถในการทำความเย็นมีค่าลดลง ดังนั้นในการเลือกพิจารณาความกว้างช่องเปิดที่เหมาะสม ควรพิจารณาจากผลรวมของค่าความสามารถในการทำความเย็นที่ทำได้ในแต่ละกรณี ซึ่งพบว่าความกว้างขนาดช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศเท่ากับ 0.175 m ให้ผลรวมของค่าความสามารถในการทำความเย็นสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 4.47 kW



(ก) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

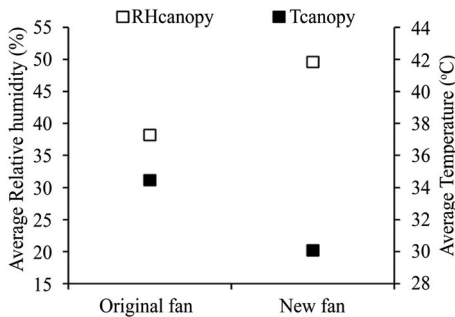


(ข) ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

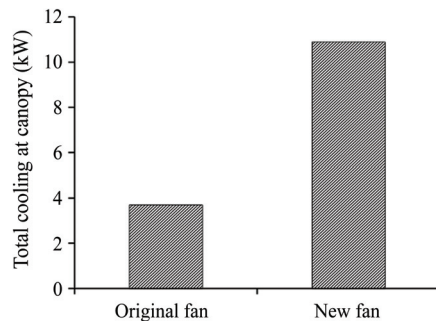


(ค) ความสามารถในการทำความเย็น

รูปที่ 11 ผลการศึกษาการปรับความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่



(ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์

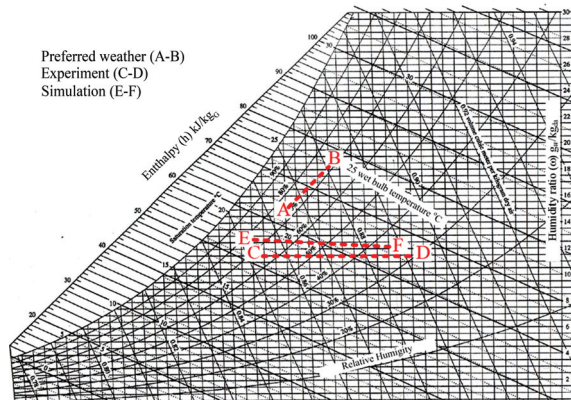


(ข) ความสามารถในการทำความเย็น

รูปที่ 12 ผลของการเปรียบเทียบศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมและเงื่อนไขเดิม

จากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบบังคับทิศทางอากาศโดยการปรับความเร็วอากาศที่ออกจากช่องเปิดและความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศพบว่า ทั้ง 2 ตัวแปรส่งผลต่อศักยภาพการทำความเย็นของอากาศบริเวณทรงพุ่ม ดังนั้นจึงนำพารามิเตอร์ความเร็วอากาศที่ออกจากช่องเปิดและความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศที่มีความเหมาะสมมาศึกษาโดยแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์อีกครั้ง โดยเลือกใช้พัดลมระบายอากาศรุ่น PVT-40 (New Fan) และปรับความกว้างช่องเปิดเป็น 0.175 m เปรียบเทียบกับพัดลมระบายอากาศเดิม (Original Fan) และขนาดช่องเปิดที่ 0.10 m ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 12(ก) และ 12(ข) จากการศึกษาพบว่า จะทำให้อัตราการระบายอากาศบริเวณทรงพุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีได้เฉลี่ยประมาณ 4.39 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 11.4 % และค่าความสามารถในการทำความเย็นเพิ่มขึ้น 7.2 kW หรือเพิ่มขึ้น 66.12 % เมื่อเทียบกับเงื่อนไขของความเร็วอากาศและความกว้างช่องเปิดเดิม



รูปที่ 13 แผนภูมิไซโครเมตริกของสภาพอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีที่ได้จากการศึกษา

จากรูปที่ 13 แสดงแผนภูมิไซโครเมตริกของสภาพอากาศบริเวณทรงพุ่มที่สตรอว์เบอร์รีที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาพอากาศที่ต้นสตรอว์เบอร์รีต้องการ โดยในตอนกลางวัน สตรอว์เบอร์รีต้องการอุณหภูมิอากาศ 25 - 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 70 - 75 % (เส้น A - B) สำหรับสภาวะอากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีจากการทดสอบใช้งานระบบความเย็นจริงพบว่า อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แปรผันระหว่าง 22.8 - 37.3 °C และ 30.67 - 68.43 % (เส้น C - D) สำหรับผลอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีจากการศึกษาแนวทางการเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า มีค่า 21.23 - 35.38 °C และ 33.2 - 77.89 °C (เส้น E - F) และมีค่าต่ำกว่าการทดสอบจริง อย่างไรก็ตามทั้ง 2 กรณียังไม่สามารถควบคุมสภาพอากาศได้ตามที่สตรอว์เบอร์รีต้องการโดยเฉพาะในช่วงเที่ยงเป็นต้นไปโดยอุณหภูมิอากาศสูงกว่าประมาณ 5 - 7 °C และความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำกว่าที่ต้องการประมาณ 20 - 40 % ในช่วงเช้าของวันระบบทำความเย็นที่พัฒนาขึ้นในการศึกษายังสามารถควบคุมสภาวะอากาศให้ใกล้เคียงกับความต้องการของต้นสตรอว์เบอร์รีได้เนื่องจากภาระโหลดความร้อนในโรงเรือนยังไม่สูงมากนัก

## บทสรุป

จากการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นบริเวณทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีโดยใช้การทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับอากาศได้รางปลูกและท่อน้ำเย็น พบว่าการใช้การทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับการบังคับทิศทางอากาศมีอิทธิพลต่อการทำความเย็นของทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รีเป็นหลัก ในขณะที่การใช้ท่อน้ำเย็นบริเวณ

ทรงพุ่มไม่สามารถช่วยลดอุณหภูมิอากาศได้ ดังนั้นการหาแนวทางเพิ่มศักยภาพการทำความเย็นของระบบ จึงมุ่งเน้นพิจารณาของการเพิ่มความเร็วอากาศได้รางปลูกและเพิ่มขนาดของความกว้างช่องเปิดของระบบ บังคับทิศทางอากาศซึ่งได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนาย จากการศึกษาพบว่า แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ และพบว่า การเพิ่มความเร็วอากาศโดยการ เลือกใช้พัดลมที่มีความเร็วอากาศที่มากขึ้นร่วมกับการเพิ่มความกว้างช่องเปิดของระบบบังคับทิศทางอากาศ ร่วมกันจะสามารถลดอุณหภูมิทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้เฉลี่ยประมาณ 4.39 °C และสามารถเพิ่มความเย็น ให้ทรงพุ่มสตรอว์เบอร์รี่ได้มากขึ้นมากกว่า 66.12 % อย่างไรก็ตามโรงเรือนที่ใช้ในงานวิจัยยังมีความจำเป็น ที่ต้องใช้ระบบทำความเย็นอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การใช้สเปรย์หมอก หรือการใช้ตาข่ายพรางแสงเพื่อช่วย ลดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องเข้าสู่โรงเรือนในช่วงเวลาที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงเกินไป สำหรับแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปปรับใช้กับโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยในการปลูก พืชชนิดอื่นได้เช่นกัน โดยอาจใช้ทำนายค่าอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนและ บริเวณทรงพุ่มให้เหมาะสมต่อพืชชนิดนั้น ๆ ก่อนที่จะเลือกไปใช้งานจริง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง กับระบบให้มีความเหมาะสมและทำให้สภาวะอากาศในโรงเรือนและบริเวณทรงพุ่มอยู่ในเกณฑ์ที่พืช สามารถเจริญเติบโตได้ดี

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561 ขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพ บัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา นาเทเวศน์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์สถานที่วิจัยมา ณ โอกาสนี้

## References

- [1] Laknizi, A., Mahdaoui, M., Ben Abdellah, A., Anoune, K., Bakhouya, M., and Ezbakhe, H. (2019). Performance Analysis and Optimal Parameters of a Direct Evaporative Pad Cooling System under the Climate Conditions of Morocco. **Case Studies in Thermal Engineering**. Vol. 13, pp. 100362. DOI: 10.1016/j.csite.2018.11.013
- [2] Xu, J., Li, Y., Wang, R. Z., Liu, W., and Zhou, P. (2015). Experimental Performance of Evaporative Cooling Pad Systems in Greenhouses in Humid Subtropical Climates. **Applied Energy**. Vol. 138, Issue C, pp. 291-301. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.10.061
- [3] Waewsak, J., Kaew-on, J., Kongruang, C., Katathirakol, S., and Nutongkaew, P. (2016). **Increasing Productivity and Input Energy Relationship with Mushroom Yield and Economic Analysis of Evaporative and Mist Cooling Greenhouse together with Automatic Solar Ventilation Systems**. Thaksin University. (in Thai)

- [4] Mehmet, A. D. and Hasan, H. S. (2015). Performance Analysis of a Greenhouse Fan-pad Cooling System: Gradients of Horizontal Temperature and Relative Humidity. **Journal of Agricultural Sciences**. Vol. 21, pp. 132-143
- [5] Romantchik, E., Rios, E., Sanchez, E., Lopez, I., and Sanchez, J. R. (2017). Determination of Energy to be Supplied by Photovoltaic Systems for Fan-pad Systems in Cooling Process of Greenhouses. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 114, pp. 1161-1168. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011
- [6] Hasan, O. Z., Atilgan, A., Buyuktas, K., and Alagoz, T. (2009). The Efficiency of Fan-pad Cooling System in Greenhouse and Building up of Internal Greenhouse Temperature Map. **African Journal of Biotechnology**. Vol. 8, No. 20, pp. 5436-5444. DOI: 10.4314/ajb.v8i20.65986
- [7] Poolkrajang, A. and Premjai, N. (2010). **Efficiency Evaluation of the Direct and Indirect Evaporative Cooling System**. Technical Education Faculty, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in thai)
- [8] Abbouda, S. K. and Almuhan, E. A. (2012). Improvement of Evaporative Cooling System Efficiency in Greenhouses. **International Journal of Latest Trends in Agriculture & Food Sciences**. Vol. 2, No. 2, pp. 83-89
- [9] Salah, H. A., Hassan, E. G., Hassan, F., Mohamed, E., and Samy, E. (2017). Analytical Investigation of Different Operational Scenarios of a Novel Greenhouse Combined with Solar Stills. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 122, pp. 297-310. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.022
- [10] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1980). **Solar Engineering of Thermal Processes**. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison
- [11] Desmarais, G., Ratti, C., and Raghavan, G. S. V. (1999). Heat Transfer Modelling of Screenhouses. **Solar Energy**. Vol. 65, Issue 5, pp. 271-284. DOI: 10.1016/S0038-092X(99)00002-X
- [12] Gupta, M. J. and Chandra, P. (2002). Effect of Greenhouse Design Parameters on Conservation of Energy for Greenhouse Environmental Control. **Energy**. Vol. 27, pp. 777-794
- [13] ASHRAE. (2009). **ASHRAE 2009 Handbook Fundamentals**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- [14] Funghnakul, M. (2012). **Reduction of Temperature in Building by Evaporative Cooling**. Master Degree of Engineering, Master of Engineering (Energy Engineer) Chiang Mai University. (in Thai)
- [15] Akaratiwa, S. and Wongcharee, K. (2011). **Thermodynamics: an Engineering Approach**. Bangkok: McGraw-Hill Education Thailand. (in Thai)
- [16] Kaewwijit, T., Kerdprasop, N., and Kerdprasop, K. (2016). The Improvement of Support Vector Regression to Forecast Time Series. **Journal of Science & Technology Mahasarakham University**. Vol. 36, Issue 4, pp. 452-458. (in Thai)
- [17] Yushi Group Co., Ltd. (2019). **Ventilation Fan**. Access (15 May 2019). Available (<https://www.yushi.co.th/product-category/ventilationfan>)