



การพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนแบบ Evaporative cooling

นิตินรงค์ พงษ์พานิช¹, วัชรพล ชยประเสริฐ², ภัทรพร สัญชาตเจตน์², อธิติเดช มูลมั่งมี³ และกฤษฎา แสงเพ็ชรส่อง⁴

¹ฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

²ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

³สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120

⁴กองวิศวกรรมเครื่องกลเรือ โรงเรือนนายเรือ สมุทรปราการ 10270

ผู้เขียนติดต่อ: นิตินรงค์ พงษ์พานิช E-mail: rdinrp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เป็นคุณสมบัติของอากาศที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตสำหรับการปลูกพืช ระบบปลูกพืชในโรงเรือนแบบ evaporative cooling ได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในงานวิจัยนี้ ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนแบบ evaporative cooling ได้ถูกพัฒนาขึ้น และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานกับโรงเรือนขนาด 2X6X2.5 (WXLXH) m³ ระบบควบคุมประกอบด้วยเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์หลายตำแหน่งและวงจรไมโครโพรเซสเซอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของปั้มน้ำและพัดลมระบายอากาศผ่าน cooling pad โปรแกรมควบคุมการทำงานถูกออกแบบบนพื้นฐานของตรรกศาสตร์ เพื่อสั่งการทำงานของพัดลมระบายอากาศแบบเปิด-ปิด ให้เหมาะสมกับค่าเป้าหมายของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน นอกจากนี้ ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานระบบควบคุมผ่าน web interface ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม เงื่อนไขการควบคุมถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือน โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ถูกควบคุมให้ไม่สูงกว่า 80% จากผลการทดสอบ อุณหภูมิบริเวณตำแหน่งใกล้ cooling pad มีค่าต่ำสุดและมีค่าสูงขึ้นตามระยะห่างจาก cooling pad อย่างไรก็ตาม ระบบสามารถควบคุมให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนเปลี่ยนแปลงอยู่ในกำหนดได้

คำสำคัญ: โรงเรือนปลูกพืช; การทำความเย็นแบบระเหย; ระบบควบคุมอัตโนมัติ

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการเกษตรของไทย มีการขยายตัวสูงขึ้น อีกทั้งยังต้องการเพิ่มคุณภาพ (quality) และผลิตภาพ (productivity) ให้ทันต่อความต้องการของตลาดเทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะ (intelligent farm) หรือฟาร์มฉลาด (smart farm) จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการทำงาน โดยเฉพาะเทคโนโลยีด้านโรงเรือนเพาะปลูกพืช (greenhouse) เป็นระบบที่สามารถควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อเจริญเติบโตของพืชเช่น ปริมาณแสง อุณหภูมิ หรือความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมได้โดยการทำงานแบบอัตโนมัติ

โรงเรือนทำความเย็นแบบระเหย (evaporative cooling greenhouse) อาศัยเทคโนโลยีการระบายความร้อนออกจาก

โรงเรือนด้วยระบบการทำความเย็นแบบระเหย (evaporative cooling system) เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชและสัตว์ [1], [2] หลักการทำงานของโรงเรือนทำความเย็นแบบระเหยอาศัยหลักการพาความร้อนจากการระเหยของน้ำที่แผงระเหยน้ำ (cooling pad) โดยการใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอก (ความชื้นต่ำ) ไหลผ่านแผงระเหยน้ำที่เปียก ความร้อนของอากาศในโรงเรือนจะเป็นความร้อนแฝง (latent heat) เพื่อใช้ในการระเหยของน้ำที่อยู่บนแผง คุณสมบัติของอากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำรวมถึงอากาศบริเวณจุดต่าง ๆ ภายในโรงเรือนจะมีอุณหภูมิลดลงและมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เมื่อพิจารณากระบวนการทำความเย็นแบบระเหยดังกล่าวบนแผนภูมิไซโครเมตริกซ์ในทาง

อุดมคติจะดำเนินบนเส้นแอนทัลปีคิงที่ หรือบนเส้นอุณหภูมิ กระเปาะเปียกคงที่ โดยสมมติให้อุณหภูมิของน้ำที่ผ่านแผง ระบายน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่เข้า แผงระบายน้ำ ดังนั้น แผงระบายน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง จะต้องสามารถลดอุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านได้มาก

การควบคุมโรงเรือนทำความเย็นแบบระเหย มีทั้งการ ควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) [3], [4] การควบคุมปริมาณหมอก (fogging control) [5] การ ควบคุมปริมาณแสง (lighting control) [6] แต่ที่มีการ นำไปใช้มากที่สุดในประเทศไทยคือ การควบคุมอุณหภูมิและ ความชื้นสัมพัทธ์ (temperature and humidity control) ซึ่งมีทั้งการใช้ตัวควบคุมทั้งแบบอาศัยแบบจำลอง (model-based controller) เช่น การควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal Control) และตัวควบคุมที่ไม่อาศัยแบบจำลอง (model-free based controller) เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) [7], [4] และการควบคุมเชิงทำนาย แบบจำลอง (Model Predictive Control) [8] เป็นต้น

จากที่กล่าวข้างต้นในส่วนที่ 1 เกี่ยวกับความสำคัญและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของโรงเรือนทำความเย็นแบบระเหย สำหรับส่วนที่ 2 ของงานวิจัยนี้ กล่าวถึง ลักษณะโครงสร้าง ของโรงเรือนและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมคุณสมบัติของ อากาศภายในโรงเรือน ในส่วนที่ 3 เกี่ยวข้องกับ การหา ประสิทธิภาพของโรงเรือน ส่วนที่ 4 เป็นการวิธีการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบตรวจความผิดพลาดของ เซ็นเซอร์ (fault tolerance) และระบบควบคุมการทำงานของ โรงเรือน(control system) ส่วนที่ 5 แสดงวิธีการและผล ของการทดลอง หลังจากนั้น จึงทำการสรุปผลและวิจารณ์ใน ส่วนที่ 6

2. การติดตั้งอุปกรณ์

โรงเรือนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาด 2x6x2.5 (WxLxH) m³ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ถังเก็บน้ำ ขนาด 2x0.15x0.15 m³ ติดตั้งบริเวณด้านล่างของแผงระบายน้ำ (cooling pad) ซึ่งมีขนาด 2x2.5 (WxL) m² ป้อนน้ำขนาดเล็ก จำนวน 2 ตัว ภายในโรงเรือน ประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศ รุ่น VF-30P ยี่ห้อ TOSHIBA จำนวน 6 ตัว และชุดเซ็นเซอร์ (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสงสว่าง) จำนวน 7 ชุดของบริษัท Aimagin เป็นต้น โดยการทำงานของอุปกรณ์ผ่านวงจรไมโคร โพรเซสเซอร์ รุ่น FIO boards ของ บริษัท Aimagin ซึ่งใช้ โปรแกรม Matlab Simulink สำหรับเขียนคำสั่งควบคุมการ ทำงานของระบบ



รูปที่ 1 โครงสร้างของโรงเรือน

การติดตั้งชุดเซ็นเซอร์ จะใช้เซ็นเซอร์ 6 ชุด ติดตั้งบริเวณ ตรงกลางภายในโรงเรือน โดยชุดเซ็นเซอร์ (id1) จะอยู่ใกล้กับ แผงระบายน้ำมีระยะห่าง 0.5 เมตร และระยะห่างของแต่ละ ชุดเซ็นเซอร์ (id2, id3, id4, id5, id6) เท่ากับ 1 เมตร แสดง ดังรูปที่ 2 โดยจะทำการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์อีกหนึ่งชุด (id7) บริเวณภายนอกโรงเรือน ห่างจากแผงระบายน้ำเป็นระยะ 1 เมตร เพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน สำหรับข้อมูลการเปรียบเทียบผล



รูปที่ 2 การติดตั้งพัดลมและชุดเซ็นเซอร์

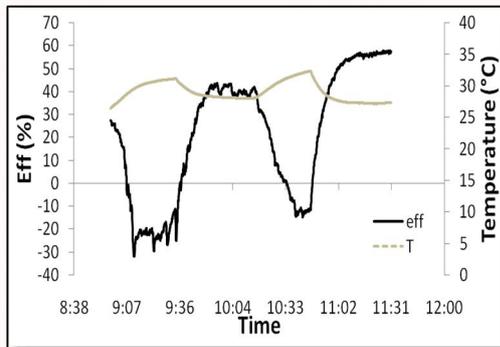
โดยระบบควบคุมเป็นแบบฝังตัว(embedded system) ซึ่งจะทำการป้อนโปรแกรมการออกแบบเข้าไปยังวงจรไมโคร โพรเซสเซอร์และการแสดงผลจะเป็นแบบเวลาจริง (real time) โดยแสดงข้อมูลผ่าน web interface เมื่อเวลา การชั่งตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 0.01 sec

3. การหาประสิทธิภาพของโรงเรือน

การควบคุมคุณสมบัติของอากาศภายในโรงเรือนต้อง ทราบถึงประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของโรงเรือน ซึ่ง สามารถหาได้จากสมการที่ (1) แสดงผลต่างของอุณหภูมิ กระเปาะแห้งของอากาศภายนอกโรงเรือน (T_{out}) กับ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ออกจาก cooling pad (T_{cool}) ต่อผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ

ภายนอกโรงเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ
 ภายนอกโรงเรือน (T_{wb}) [1]

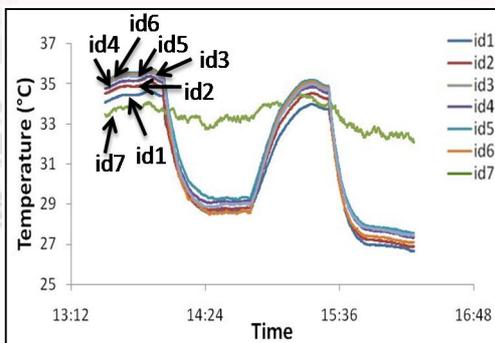
$$\%efficiency = \frac{T_{out} - T_{cool}}{T_{out} - T_{wb}} \times 100\% \quad \dots(1)$$



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิ (เปอร์เซ็นต์)

จากรูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิในช่วงเวลาที่ค่าประสิทธิภาพมีสถานะคงตัว (steady state) โดยผลจากช่วง 9:52-10:16 น. ได้มาจากการเปิดพัดลมดูดอากาศจำนวน 3 ตัว ซึ่งมีความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน cooling pad เฉลี่ยได้ 0.45 m/s และช่วง 11:13-11:30 น. ทำการเปิดพัดลมดูดอากาศ 6 ตัว วัดความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน cooling pad เฉลี่ยได้ 0.9 m/s จากผลการทดลองประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิสูงสุด อยู่ที่ 42% และ 58% ตามลำดับ

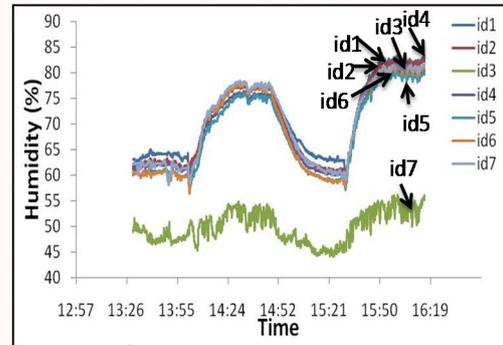
หลังจากนั้น ทำการทำการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของเซ็นเซอร์แต่ละชุดโดยแสดงได้ดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยที่ ชุดเซ็นเซอร์ (id7) อยู่ภายนอกโรงเรือน และ ชุดเซ็นเซอร์ (id1) อยู่ใกล้กับแผงระเหยน้ำดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ cooling pad จะมีอุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิจะสูงขึ้น เมื่อมีระยะห่างจาก cooling pad เพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกัน

การกระจายตัวของความชื้นที่ตำแหน่งใกล้ cooling pad จะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงที่สุดและความชื้นสัมพัทธ์จะลดลง เมื่อระยะห่างจาก cooling pad เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดที่ตำแหน่งหน้าพัดลมดูดอากาศ



รูปที่ 5 การกระจายตัวของความชื้นสัมพัทธ์

4. ระบบควบคุมสำหรับโรงเรือน

เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เป็นคุณสมบัติของอากาศที่มีความแปรผกผันกันของระบบ evaporative cooling ซึ่งเป็นปัญหาที่ยากต่อการควบคุมคุณสมบัติของอากาศทั้งสองให้ได้ตามค่าเป้าหมาย ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการเลือกควบคุมอุณหภูมิเป็นหลักโดยคำนึงถึงความชื้นสัมพัทธ์ไม่ให้เกินค่าที่กำหนดไว้ (80%RH)

โดยระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ

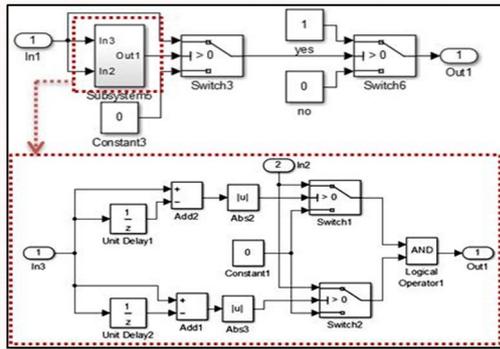
1) ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เพื่อให้ได้ตามค่าที่ผู้ใช้งานกำหนด โดยใช้พื้นฐานของตรรกศาสตร์สั่งการทำงานของพัดลมแต่ละตัวให้ทำงานแบบปิด-เปิด (on-off operation) ดังตารางที่ 1 แสดงช่วงของอุณหภูมิที่สั่งการทำงานพัดลมแต่ละตัว โดยช่วงอุณหภูมิถูกกำหนดมาจากประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิสูงสุดของโรงเรือน จากการทดสอบ โรงเรือนสามารถลดอุณหภูมิลงได้ 6 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิภายนอก ดังนั้น อุณหภูมิเป้าหมายจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างความสามารถในการลดอุณหภูมิของโรงเรือน

2) การตรวจจับความผิดพลาดของเซ็นเซอร์ (fault detection) ข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของเซ็นเซอร์แต่ละตัวในโรงเรือนจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้สำหรับการควบคุม โดยอาศัยอัลกอริธึม ดังรูปที่ 6 เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของเซ็นเซอร์ (“0”:เสียและ“1”:ปกติ) ถ้าเซ็นเซอร์เสียจะไม่นำข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตัวนั้นไปคำนวณ โดยวิธีการตรวจสอบทำได้โดยการวัดข้อมูลปัจจุบัน (P[n]) เปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนหน้า 10 ข้อมูล หรือ (P[n-

10) เมื่อ ระบบใช้เวลาการชักตัวอย่างของเซ็นเซอร์ เท่ากับ 10 วินาที

ตารางที่ 1 การทำงานของพัลลวมในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิ	1	2	3	4	5	6
0 ≤ t < 10	on	on	on	on	on	on
10 ≤ t < 20	on	off	on	on	on	on
20 ≤ t < 30	off	off	off	on	on	on
30 ≤ t < 40	off	off	off	on	off	on
40 ≤ t < 50	off	off	off	off	on	off

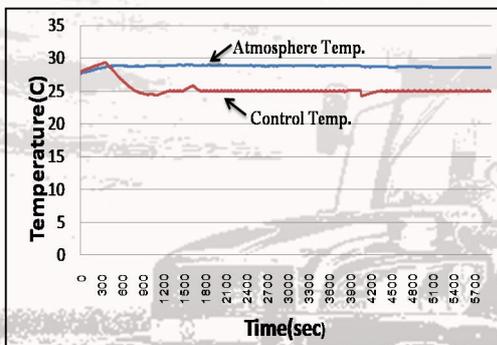


รูปที่ 6 การตรวจสอบความผิดปกติของเซ็นเซอร์

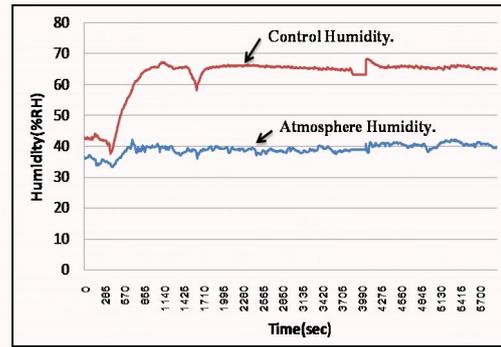
5. ผลการทดลอง

การทดสอบการทำงานเพื่อลดอุณหภูมิภายในโรงเรือน จากรูปที่ 7 ซึ่งอุณหภูมิเป้าหมาย คือ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิภายนอกอยู่ในช่วง 29 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นว่า เมื่อระบบควบคุมเริ่มทำงานอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะลดลงจนถึงเวลาประมาณ 750 วินาที (12.5 นาที) อุณหภูมิภายในโรงเรือนจะอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส ตามอุณหภูมิเป้าหมาย

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเพิ่มขึ้นจากความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือนประมาณ 40 %RH เป็น 67 %RH ภายในโรงเรือน ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยดูจากรูปที่ 8

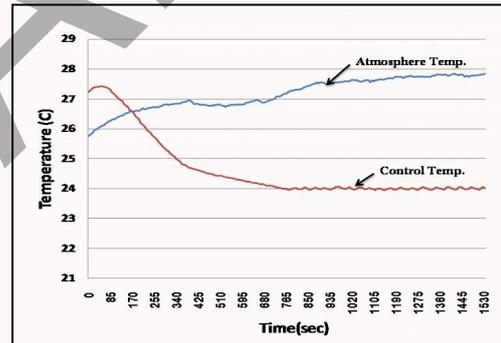


รูปที่ 7 ผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

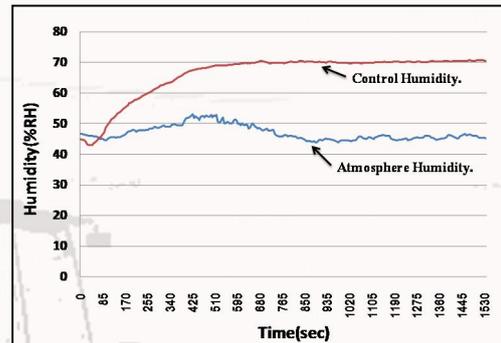


รูปที่ 8 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์จากการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป้าหมายเป็น 24 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบการทำงานของระบบควบคุม โดยอุณหภูมิภายนอกประมาณ 28 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในค่าเป้าหมายภายในระยะเวลาประมาณ 680 วินาที (11.3 นาที) ดังรูปที่ 9 ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ ภายในโรงเรือนแสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนประมาณ 70 %RH



รูปที่ 9 ผลการควบคุมอุณหภูมิที่ 24 องศาเซลเซียส



รูปที่ 10 ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการควบคุมอุณหภูมิที่ 24 องศาเซลเซียส

6. สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของโรงเรือนสูงสุดอยู่ที่ 58% โดยการควบคุม ประกอบด้วยระบบตรวจสอบความผิดพลาดของเซ็นเซอร์และระบบควบคุมการทำงานของพัดลม ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 4-6 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน ภายในระยะเวลาประมาณ 12 นาที จากผลการศึกษาเพื่อควบคุมคุณสมบัติของอากาศภายในโรงเรือน มีปัจจัยหลายส่วนซึ่งเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของโรงเรือน เช่น สถานที่ทำการทดลอง ซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันในแต่ละสถานที่ ช่วงเวลาที่ทำการทดลอง มีผลต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงเรียนนายเรือสำหรับการสนับสนุนโรงเรือน ทำความเย็นแบบระเหย เซ็นเซอร์ อุปกรณ์และทุนสนับสนุนสำหรับการทำงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Watt, J.R., Koral, R.L., Crow, L.W. and Greenberg, A., 1986. Theory of direct evaporative cooling. Evaporative air conditioning handbook, New York, Chapman & Hall.
- [2] Gerrit van Straten, Gerard van Willigenburg, Eldert van Henten and Rachel van Ooteghem, 2011, Optimal Control of Greenhouse Cultivation, USA, CRC Press.
- [3] R. Linker, P.O. Gutman, I. Seginer, 1999, Robust controllers for simultaneous control of temperature and CO₂ concentration in greenhouses, Control Engineering Practice, Vol. 7, pp. 851-862.
- [4] R. Tawegoum, R. Teixeira, G. Chasseriaux, 2006. Simulation of humidity control and greenhouse temperature tracking in a growth chamber using a passive air conditioning unit, Control Engineering Practice, Vol. 14, pp. 853-861.
- [5] A. Perdignes, J.L. Garcia, A. Romero, A. Rodriguez, L. Luna, C. Raposo and S. de la Plaza, 2008, Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation, Biosystems Engineering, Vol. 99, pp. 573-586.

- [6] Ilya Ioslovich, 2009, Optimal control strategy for greenhouse lettuce: Incorporating supplemental lighting, Biosystems Engineering, Vol. 103, pp.57-67.
- [7] Albert Setiawana, Louis D. Albright, Richard M. Phelan, 2000, Application of pseudo-derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control, Computers and Electronics in Agriculture, pp. 283-302.
- [8] M.Y. El Ghoumaria, H.-J. Tantau, J. Serrano, 2005, Non-linear constrained MPC: Real-time implementation of greenhouse air temperature control, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 49, pp. 345-356.