

การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ

วัศพล จันพ่าย¹ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ^{1*} และ กระวี ตรีอำนาจ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

^{1, 2}111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 31 กรกฎาคม 2566 แก้ไขบทความ 15 ตุลาคม 2566 ตอรับบทความ 31 ตุลาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ระบบการควบคุมแบ่งออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 70 และระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศที่ 0.85 กิโลปาสคาล พบว่าระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียสได้ ในวันที่อากาศมีอุณหภูมิไม่สูง แต่ในวันที่อุณหภูมิของอากาศสูงระบบไม่สามารถควบคุมหรือลดอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าตามที่กำหนดได้ แต่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าต่ำกว่าภายนอกโรงเรือนอยู่ประมาณ 5-7 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนได้ทุกวันทำการทดสอบให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 แต่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าสูงประมาณ 28-35 องศาเซลเซียส และระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศสามารถควบคุมให้มีค่าตามที่กำหนดได้บางช่วงเวลา โดยจะแปรผันไปตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชในโรงเรือน การใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและการทำงานของระบบควบคุมเป็นหลัก โดยในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ จะทำให้มีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากระบบควบคุมใช้เวลาในการทำงานที่ยาวนานขึ้นและใช้น้ำปริมาณมากขึ้นในการระเหยเพื่อเติมน้ำเข้าไปในอากาศจนกว่าจะได้ค่าตามที่กำหนด ซึ่งระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดและระบบควบคุมอุณหภูมิมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ระบบควบคุมอุณหภูมินั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศ

คำสำคัญ : โรงเรือนเพาะปลูก; ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ; อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4694 2933, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tawarat@sut.ac.th

Temperature and Relative Humidity Control in a Greenhouse Evaporative Cooling-pad system

Watsapon Junpayap¹ Tawarat Treeamnuk^{1*} and Krawee Treeamnuk²

¹School of Agricultural engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²School of Mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

^{1,2}111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Received 31 July 2023; Revised 15 October 2023; Accepted 31 October 2023

Abstract

This research aimed to study the control of temperature and relative humidity of the air inside a greenhouse equipped with an evaporative cooling pad system. The control system was divided into 3 systems: The temperature control system at 25°C, the relative humidity control system at 70% RH, and the vapor pressure deficit (VPD) control system at 0.85 kPa. It was found that on a cool day, the temperature control system can maintain an average temperature of about 25°C. However, on a hot day, the system cannot effectively control or reduce the average temperature inside the greenhouse to the required value. Nonetheless, it can successfully control the average temperature inside the greenhouse to be about 5-7°C lower than outside the greenhouse. The relative humidity control system maintained the average relative humidity inside the greenhouse at about 70% RH every day of the test, but the average temperature inside the greenhouse was about 28-35°C. The VPD control system can be maintained at the specified value for some time; it varies according to the temperature and relative humidity of the air. However, the average temperature and relative humidity inside the greenhouse were still within the suitable range for growing plants in the greenhouse. The water and electricity consumption of the system depends mainly on the weather conditions and the operation of the control system. The relative humidity control system consumes the lowest electrical consumption, while the temperature control system has the highest electrical consumption. Therefore, the temperature control system has the highest cost compared with the relative humidity control system and the vapor pressure deficit control system.

Keywords : Greenhouse; Evaporative cooling pad system; Temperature and relative humidity

** Corresponding Author. Tel.: +668 4694 2933, E-mail Address: tawarat@sut.ac.th*

1. บทนำ

โรงเรือนเพาะปลูก (Greenhouse) คือ สิ่งก่อสร้างที่มีโครงสร้างของผนังและหลังคาเป็นวัสดุ โปร่งแสงที่ให้แสงซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ผ่านเข้ามาได้ และมีความสูงเพียงพอต่อการเข้าไป ปฏิบัติงานของมนุษย์ [1] โรงเรือนเพาะปลูกนั้นมี ประโยชน์ที่สำคัญคือสามารถปกป้องพืชจาก สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ได้ เช่น อุณหภูมิ ศัตรูธรรมชาติ และภัยธรรมชาติต่างๆ ซึ่งยังสามารถควบคุมปัจจัยที่จำเป็นและเหมาะสมต่อ การเจริญเติบโตของพืชและช่วยเพิ่มผลผลิต ปัจจัย เหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสง ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดจนถึงปริมาณธาตุอาหารที่พืช ต้องการ [2]

เนื่องจากสภาพอากาศในประเทศไทยนั้นจัดอยู่ในพื้นที่เขตร้อนชื้นจึงทำให้ในฤดูร้อนอุณหภูมิภายใน โรงเรือนนั้นมีอุณหภูมิสูง มีการสะสมความร้อนภายใน โรงเรือนและไม่มีการระบายอากาศออกสู่ภายนอก ส่งผล ให้อุณหภูมิสูงเกินกว่าที่พืชต้องการจึงส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช ในการแก้ปัญหาเรื่องความร้อน ภายในโรงเรือน ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ จึงเป็น ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในโรงเรือนเพาะปลูกในพื้นที่ เขตร้อน มีข้อดีคือ สามารถลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น ภายในโรงเรือน ซึ่งระบบทำความเย็นแบบการระเหยน้ำ ที่นิยมใช้มี 2 ระบบ ได้แก่ แบบพ่นหมอก และแบบแผ่น ระเหยน้ำ อีกทั้งมีการใช้ตาข่ายพรางแสงร่วมด้วยเพื่อช่วย ลดความร้อนที่แผ่เข้าสู่โรงเรือน [3], [4] ซึ่งระบบทำความ เย็นแบบแผ่นระเหยน้ำนั้นมีจุดเด่นกว่าแบบพ่นหมอกคือ สามารถลดอุณหภูมิได้รวดเร็ว และเพิ่มความชื้นใน อากาศได้รวดเร็ว และเมื่อระบบทำงานต่อเนื่องความชื้น ในอากาศที่ได้ไม่มากเกินไปเหมือนกับแบบพ่นหมอกที่มี ความชื้นสูงจนเกิดหยดน้ำไปเกาะที่ผิวใบพืชซึ่งจะส่งผล กระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและประหยัดการใช้น้ำ กว่าแบบพ่นหมอก [5] ยิ่งไปกว่านั้นความชื้นที่มากเกินไป

จะทำให้เชื้อราและโรคต่างๆ เจริญเติบโตได้ดีและเข้า ทำลายพืชได้ [6]

ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ (Evaporative Cooling Pad System) เป็นระบบทำ ความเย็นที่ใช้แผ่นระเหยน้ำหรือแผงรังผึ้ง (Cooling Pad) ร่วมกับพัดลม อาศัยหลักการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling) คือเมื่ออากาศร้อนผ่านแผ่น ระเหยน้ำที่เปิกความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ของ อากาศจะสูญเสียไป เนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นการร้อน แฝง (Latent Heat) น้ำที่ระเหยจากแผ่นระเหยน้ำจะทำ ให้อากาศเย็นลงและชื้นเพิ่มขึ้น [7] ซึ่งความร้อนที่ใช้ใน การระเหยนี้มาจากความร้อนของอากาศไม่จำเป็นต้อง จัดหาพลังงานใดมาให้ความร้อน พัดลมดูดอากาศที่ ติดตั้งหน้าแผ่นระเหยน้ำทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ให้อากาศเคลื่อนที่ เมื่อระบบทำงานอย่างต่อเนื่องจะส่งผล ให้ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือน เพาะปลูกให้ต่ำกว่าสภาพภายนอกได้ตามประสิทธิภาพ ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะสามารถลดอุณหภูมิได้ประมาณ 7 องศาเซลเซียส [8] แต่ยังมีปัจจัยหลายส่วนที่เกี่ยวข้อง กับประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของโรงเรือน เช่น สถานที่ทดสอบ ช่วงเวลาทดสอบ ขนาดและความยาว ของโรงเรือนที่ทำให้อุณหภูมิและความชื้นในแต่ละช่วงที่ ระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำไม่เท่ากัน [9]-[11] ซึ่งการ ปลูกพืชภายในโรงเรือนจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาพ อากาศให้มีการเหมาะสมต่อการปลูกพืช ซึ่งการปลูกพืช ในโรงเรือนให้เจริญเติบโตได้นั้นอุณหภูมิในโรงเรือน ควรอยู่ในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส [12] ความชื้น สัมพัทธ์ควรอยู่ที่ร้อยละ 60-80 [13] และค่าแรงดึง ระเหยน้ำของอากาศในโรงเรือนควรอยู่ที่ 0.45-1.25 กิโลปาสกาล [12]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการควบคุม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน ให้มีสภาพ อากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เพื่อให้ เกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืช



รูปที่ 1 ก) ตู้ควบคุมควบคุมโรงเรือน ข) ด้านหน้าโรงเรือน ค) ด้านหลังโรงเรือน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 โรงเรือนเพาะปลูก

โรงเรือนแบบปิดขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3 เมตร โครงสร้างเป็นท่อเหล็กเคลือบสังกะสี ผึง พื้น และหลังคาคลุมด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีนหนา 0.15 มิลลิเมตร หลังคาทรงโค้งคลุมเสริมด้วยตาข่ายพรางแสง ซึ่งมีความสามารถในการพรางแสง 50 เปอร์เซ็นต์ วางซ้อนกัน 2 ชั้น ดังรูปที่ 1 ตั้งอยู่ที่อาคารจักรกลเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย (พิกัดตำแหน่งละติจูด 14.8925 N ลองจิจูด 102.0039 E) การวางแผนมีทิศตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยด้านหน้าโรงเรือนหันไปทางทิศตะวันตกและด้านท้ายโรงเรือนหันไปทางทิศตะวันออก ซึ่งโรงเรือนประกอบด้วยพัดลมหมุนเวียนอากาศขนาด 12 นิ้ว กำลังไฟ 27 วัตต์ จำนวน 2 ตัวภายในโรงเรือน พัดลมระบายอากาศขนาด 16 นิ้ว กำลังไฟ 190 วัตต์ ปริมาณลม 4,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที จำนวน 4 ตัวด้านหน้าของโรงเรือนซึ่งทำหน้าที่ดึงอากาศในโรงเรือนออกสู่ภายนอกโรงเรือน แผ่นระเหยน้ำผลิตจากเยื่อกระดาษคราฟท์ ท่ออากาศสูง 7 มิลลิเมตร ทำมุมตัดกัน 90 องศา แบบ 45x45 องศา มีขนาด กว้าง 3.6 เมตร สูง 1.8 เมตร หนา 0.15 เมตร ด้านหลังโรงเรือน ใช้ปั้มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า อัตราการไหลของน้ำ 32 ลิตรต่อนาที

หมุนเวียนน้ำให้แผ่นระเหยน้ำ ควบคุมแรงดันน้ำด้วยวาล์วเปิด-ปิด

2.2 อุปกรณ์การวัดและการบันทึกข้อมูล

ระบบควบคุมใช้บอร์ด Arduino Mega360 ในการรับและประมวลผลข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ตามรูปที่ 1 ก) ซึ่งใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรุ่น DHT22 ที่ถูกติดตั้งภายในและภายนอกโรงเรือน มีตำแหน่งการวัดที่ 1, 2, 3 อยู่ภายในโรงเรือนและตำแหน่งที่ 4 อยู่ภายนอกโรงเรือนที่ระยะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นนำข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมาวิเคราะห์และสั่งการทำงานของปั้มน้ำและพัดลมที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้อ่านค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า วัดปริมาณการใช้น้ำโดยการตวงน้ำและเติมน้ำชดเชยส่วนที่ใช้ไปถึงเก็บน้ำ

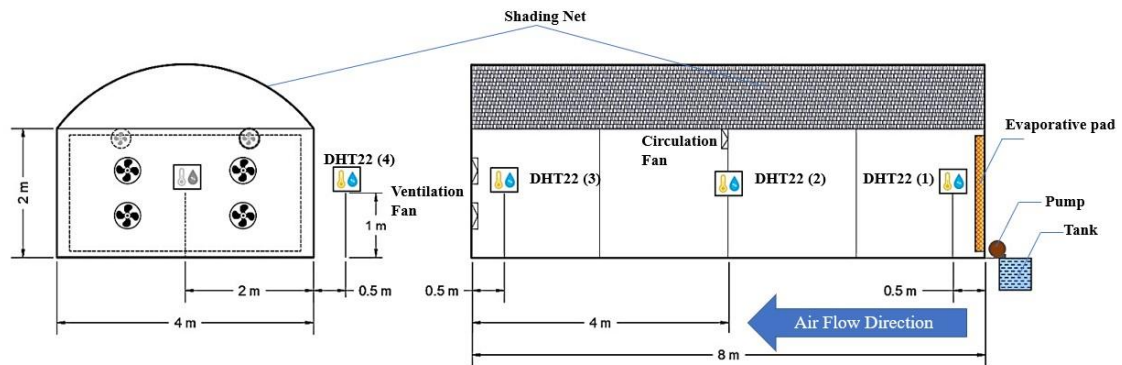
2.3 ระบบควบคุมสภาพอากาศของโรงเรือน

เนื่องจากค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีค่าที่แปรผกผันต่อกัน ซึ่งในการควบคุมค่าทั้งสองนั้นไปพร้อมกันทำได้ค่อนข้างยากหากใช้แค่ระบบทำความเย็นอย่างเดียว ดังนั้นจึงได้แบ่งการควบคุมเป็นการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ออกจากกัน และยังมีการควบคุมค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ผ่านค่าแรงดันระเหยน้ำของอากาศ

2.3.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ระบบควบคุมอุณหภูมิ จะเปิดการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศภายในโรงเรือน เป็นตัวกำหนดค่าที่ 25 องศาเซลเซียส โดยเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย

ภายในโรงเรือนมีค่ามากกว่า 25 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำจะทำงาน แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำจะหยุดทำงาน



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งการวัดของเซนเซอร์ DHT22

2.3.2 ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ จะเปิดการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนเป็นตัวกำหนดค่าที่ร้อยละ 70 โดยที่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 70 ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำจะทำงาน แต่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำจะหยุดทำงาน

เท่ากับ 0.85 กิโลปาสกาล ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำจะหยุดทำงาน

ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [14] ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิกับความดันไอน้ำของอากาศที่เกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$VPD = (P_{sat} - P_{air}) / 1000 \quad (1)$$

โดยที่

VPD = แรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (กิโลปาสกาล)

P_{sat} = ความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศ (เมกกะปาสกาล)

P_{air} = ความดันไอน้ำของอากาศ (เมกกะปาสกาล)

2.3.3 ระบบควบคุมแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ

ระบบควบคุมแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ จะเปิดการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ใช้ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนมาคำนวณค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD) มาเป็นตัวกำหนดค่าที่ 0.85 กิโลปาสกาล โดยที่เมื่อค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศภายในโรงเรือนมีค่ามากกว่า 0.85 กิโลปาสกาล ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำจะทำงาน แต่เมื่อค่าแรงดึงระเหยน้ำภายในโรงเรือนต่ำกว่าหรือ

ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Saturation Vapor Pressure, P_{sat}) คือจุดที่อากาศอิ่มตัวหรือมีไอน้ำได้เต็มที่ที่อุณหภูมิและแรงดัน ณ ขณะนั้นๆ ความดันไอน้ำ

อิมตัวของอากาศในช่วงอุณหภูมิ 0 - 200 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2) [15]

$$\ln P_{sat} = \frac{C_1}{T_{db}} + C_2 + C_3 T_{db} + C_4 T_{db}^2 + C_5 T_{db}^3 + C_6 \ln T_{db} \quad (2)$$

โดยที่

$$C_1 = -5.8002206 \times 10^3$$

$$C_2 = 1.3914933$$

$$C_3 = -4.8640239 \times 10^{-2}$$

$$C_4 = 4.1764768 \times 10^{-5}$$

$$C_5 = -1.4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = 6.5459673$$

$$T_{db} = \text{อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (เคลวิน)}$$

ความดันไอน้ำของอากาศ (Vapor Pressure, P_{air}) จะสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ คือ มวลไอน้ำในอากาศต่อมวลไอน้ำที่อากาศขณะนั้นรับได้ หรือความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิมตัวของอากาศที่อุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในสมการ (3) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาความดันไอน้ำของอากาศจากสมการ (4) [15]

$$\theta = \frac{P_{air}}{P_{sat}} \quad (3)$$

$$P_{air} = P_{sat} \theta \quad (4)$$

โดยที่

$$\theta = \text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ไม่มีหน่วย)}$$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การควบคุมอุณหภูมิ

การทดสอบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือน เห็นได้ว่าในวันที่อากาศเย็น เช่น ใน Day 1 (27/01/2566) ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิภายนอก

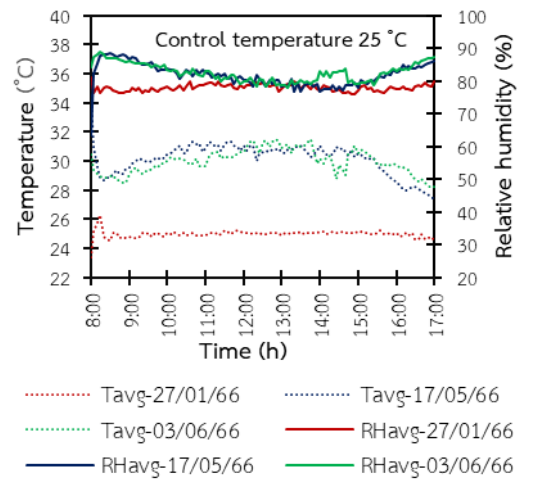
โรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 29.6 องศาเซลเซียส ระบบสามารถควบคุมค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ได้ตลอดทั้งวัน ส่วนในวันที่อากาศร้อนเช่นใน Day 2 (17/05/2566) และ Day 3 (03/06/2566) ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 36.7 และ 35.2 องศาเซลเซียสตามลำดับ ระบบไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่า 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวันสูงกว่าโดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 30.2 และ 30.0 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่ยังมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันประมาณ 5-6 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันยังมีค่าสูงประมาณร้อยละ 78-82

การวิเคราะห์อุณหภูมิตามตำแหน่งการวัด ซึ่งมีทิศทางที่วัดตามแนวยาวที่กึ่งกลางของโรงเรือน จะเห็นได้ว่าการไล่ระดับของอุณหภูมิตามแนวยาวของโรงเรือน โดยที่ด้านท้ายโรงเรือนมีอุณหภูมิต่ำสุดและด้านหน้าโรงเรือนมีอุณหภูมิสูงสุด การเกิดการไล่ระดับของอุณหภูมินั้นมีสาเหตุมาจาก เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านแผ่นระเหยน้ำทำให้อากาศมีอุณหภูมิที่ลดต่ำลงทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิต่ำ จากนั้นเมื่ออากาศเคลื่อนที่ตามแนวยาวของโรงเรือน อากาศภายในโรงเรือนก็จะมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอากาศภายในโรงเรือนได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้าสู่โรงเรือนทางด้านผนังและหลังคา จึงเกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อุณหภูมิของอากาศค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่กำลังเคลื่อนที่ออกนอกโรงเรือน จึงทำให้อากาศด้านท้ายโรงเรือนมีการสะสมความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ตำแหน่งด้านหน้าโรงเรือนมีอุณหภูมิสูงสุด

ผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ได้คล้ายกับงานวิจัยในเขตพื้นที่แหล่งเลี้ยงที่นิยมใช้ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำในโรงเรือน เช่น Tsafaras et al. [5] ได้มีการ

พัฒนาโรงเรือนเพาะปลูกในประเทศซาอุดีอาระเบียให้ลดการใช้น้ำโดยการออกแบบและปรับปรุงโรงเรือน โดยในช่วงกลางวันนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 25-28 องศาเซลเซียส Oz et al. [16] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นและการกระจายตัวของอุณหภูมิในโรงเรือนที่ประเทศตุรกี ซึ่งในช่วงที่อากาศภายนอกนั้นมีอุณหภูมิสูงสุดคือ 35 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนลงได้ 7-13 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าของอุณหภูมินั้นมีค่าสูงขึ้นตามระยะห่างจากแผ่นระเหยน้ำ และ Mehmet กับ Sillesi [17] ศึกษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในแนวนเส้นตรงซึ่งเป็นแนวเดียวกับการปลูกพืชในโรงเรือนที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำร่วมกับตาข่ายพรางแสงที่ติดตั้งใต้หลังคาในประเทศตุรกี ซึ่งในช่วงเวลา 14.00-15.00 น. เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งมีค่าเฉลี่ย 31.44 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นนี้

สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนลงได้ โดยอุณหภูมิภายในมีค่าเฉลี่ยที่ 24.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ย (Tavg) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RHavg) ภายในโรงเรือนเมื่อใช้การควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ข้อมูลการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ

ข้อมูล	Day 1	Day 2	Day 3
	(27/01/2566)	(17/05/2566)	(03/06/2566)
อุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (องศาเซลเซียส)	29.6	36.7	35.2
ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน (ร้อยละ)	50.0	48.9	52.2
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (องศาเซลเซียส)	25.0	30.2	30.0
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (เปอร์เซ็นต์)	78.0	81.8	82.6
แรงดันระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (กิโลปาสกาล)	0.70	0.79	074
การใช้น้ำตลอดทั้งวัน (ลิตร)	264.0	423.0	406.5
การใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	4.43	7.47	7.63

ตารางที่ 2 ข้อมูลการทดสอบระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

ข้อมูล	Day 1	Day 2	Day 3
	(2/02/2566)	(13/02/2566)	(04/06/2566)
อุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (องศาเซลเซียส)	32.6	34.4	35.4
ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน (ร้อยละ)	46.1	53.8	58.5
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (องศาเซลเซียส)	28.6	32.9	35.4
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (เปอร์เซ็นต์)	70.4	70.6	70.8

ข้อมูล	Day 1 (2/02/2566)	Day 2 (13/02/2566)	Day 3 (04/06/2566)
แรงดันระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (กิโลปาสกาล)	1.17	1.47	1.69
การใช้น้ำตลอดทั้งวัน (ลิตร)	232.5	162.0	147.0
การใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	2.84	1.89	1.87

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดสอบระบบควบคุมค่าแรงดันระเหยน้ำของอากาศ

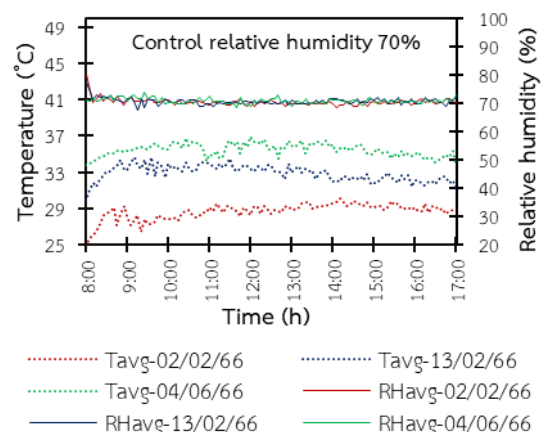
ข้อมูล	Day 1 (19/03/2566)	Day 2 21/03/2566	Day 3 22/03/2566
อุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (องศาเซลเซียส)	34.9	36.6	37.8
ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน (ร้อยละ)	50.9	49.1	41.1
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (องศาเซลเซียส)	29.9	30.5	30.3
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (เปอร์เซ็นต์)	79.2	79.5	78.1
แรงดันระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวัน (กิโลปาสกาล)	0.88	0.90	0.95
การใช้น้ำตลอดทั้งวัน (ลิตร)	309.0	357.0	415.5
การใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งวัน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	5.05	5.76	6.16

3.2 การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

การทดสอบการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนจะเห็นได้ว่าในวันที่อุณหภูมิของวันไม่สูงมากและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเช่นในวันที่ Day 1 (02/02/2566) ดังตารางที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 32.6 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ร้อยละ 46.1 ระบบสามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 ได้ตลอดทั้งวัน เช่นเดียวกันกับวันที่มีอุณหภูมิสูงเช่นใน Day 2 (13/02/2566) และ Day 3 (04/06/2566) ดังตารางที่ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ 34.4 และ 35.4 องศาเซลเซียสตามลำดับ และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ร้อยละ 53.8 และ 58.5 ตามลำดับ ระบบสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 (รูปที่ 4)

ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์สามารถควบคุมค่าความชื้น

สัมพัทธ์ภายในโรงเรือนได้ แต่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนที่ทดสอบในแต่ละวันนั้นยังมีค่าสูงและขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละวัน โดยในวันที่อากาศเย็นอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าต่ำ และเมื่อในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าสูงขึ้นแปรผันไปตามกัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ย (Tavg) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RHavg) ภายในโรงเรือนเมื่อใช้การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

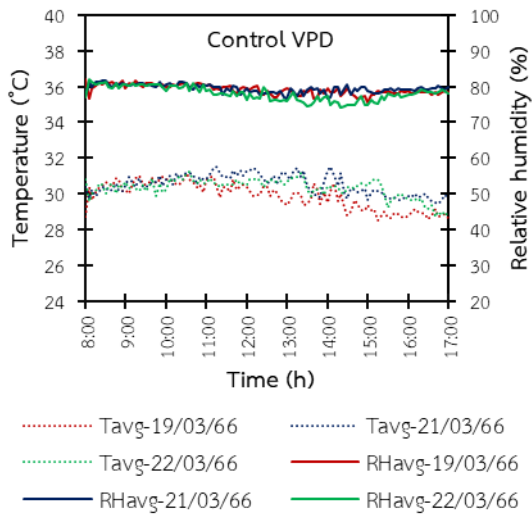
จากผลการทดสอบการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน เกิดการไล่ระดับของความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน เช่นเดียวกับการไล่ระดับของอุณหภูมิที่เคยกล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ แต่การไล่ระดับของความชื้นสัมพัทธ์นั้นจะมีค่าแปรผกผันกับการไล่ระดับของอุณหภูมิ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งวัดที่ใกล้แผ่นระเหยน้ำมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดจากนั้นค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงตามระยะทาง ซึ่งด้านหน้าโรงเรือนเป็นตำแหน่งก่อนที่อากาศจะถูกพัดลมดูดออกนั้นมีค่าต่ำสุด

ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยทางพื้นที่เขตแห้งแล้งที่มีความชื้นต่ำ ซึ่งนิยมใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำที่จะช่วยเพิ่มความชื้นให้กับอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก เช่นในประเทศตุรกี Mehmet กับ Silileli [17] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำและตาข่ายพรางแสงร่วมด้วย นอกจากจะช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนแล้ว ยังพบว่าที่ช่วงอุณหภูมิสูงที่ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดที่ร้อยละ 23.09 ระบบทำความเย็นนี้สามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้เพิ่มขึ้นได้ถึงร้อยละ 57.5 Sultan et al. [12] ได้ประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ซึ่งแผ่นระเหยน้ำทำจากฟางข้าว โดยสามารถเพิ่มความชื้นให้กับอากาศภายในโรงเรือนได้สูงถึงร้อยละ 57.16 ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้านนอกโรงเรือนต่ำถึงร้อยละ 22.50 Tsafaras et al. [5] ได้ศึกษาการลดการใช้ น้ำของโรงเรือนที่ประเทศซาอุดีอาระเบีย ที่มีการออกแบบปรับปรุงทางด้านโครงสร้างและตำแหน่งการติดตั้งระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำ ซึ่งโรงเรือนที่ดัดแปลงแล้วสามารถ

ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 65-85 และ Aljubury กับ Ridha [18] ได้ใช้เครื่องทำความเย็นแบบระเหยทางอ้อมร่วมกับแผ่นระเหยน้ำ 3 ชั้นที่เป็นการระเหยโดยตรงในการทำความเย็นให้กับโรงเรือนทดสอบที่ประเทศอิรักซึ่งใช้น้ำใต้ดินมาใช้ในการหมุนเวียนระบบซึ่งมีความเย็นต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 24 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงถึง 50 องศาเซลเซียส ระบบทำความเย็นสามารถลดทำอุณหภูมิในโรงเรือนเรือนกระจกลงประมาณ 12.1-21.6 องศาเซลเซียส และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จากร้อยละ 8 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 62 เมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อม จากตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าโรงเรือนระบบทำความเย็นแบบแผ่นระเหยน้ำนี้ สามารถออกแบบระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้กับโรงเรือนได้เป็นอย่างดี

3.3 การควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ

จากผลการควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศในโรงเรือน ใน Day 1 (19/03/2566), Day 2 (21/03/2566) และ Day 3 (22/03/2566) ระบบสามารถควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศให้มีค่า 0.85 กิโลปาสกาลได้ในบางช่วงเวลา ซึ่งค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งวันมีค่าอยู่ที่ 0.88 0.90 และ 0.95 กิโลปาสกาลตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 29.9 30.5 และ 30.3 องศาเซลเซียสตามลำดับ และค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในโรงเรือนตลอดทั้งวันอยู่ที่ร้อยละ 79.2 79.5 และ 78.1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ย (Tavg) และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RHavg) ภายในโรงเรือนเมื่อใช้การควบคุมค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD)

จากตารางที่ 3 โดยใน Day 1 (19/03/2566) มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 28.5-31.1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงร้อยละ 75.5-82.1 Day 2 (21/03/2566) มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 29.4-31.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงร้อยละ 76.5-81.7 และ Day 3 (22/03/2566) มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ในช่วง 28.7-31.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงร้อยละ 74.3-82.2 ซึ่งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

ผลลัพธ์ของค่าแรงดึงระเหยน้ำภายในโรงเรือนที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยทางพื้นที่เขตแห้งแล้งที่มีความชื้นต่ำในเขตทางประเทศแถบตะวันออกกลาง เช่นงานวิจัยของ Alsadon et al. [19] ที่ศึกษาสภาพอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกแบบแผ่นระเหยน้ำที่ใช้วัสดุคลุมโรงเรือนต่างชนิดกันเพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุคลุมโรงเรือนต่อผลผลิตของแตงกวาในประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยมีโรงเรือนที่ใช้ทดสอบ 3 หลัง พบว่าตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบการปลูกแตงกวา ค่าแรงดึง

ระเหยน้ำของอากาศภายในโรงเรือนมีค่าเฉลี่ยตลอดเวลาที่ทดสอบของแต่ละโรงเรือนอยู่ที่ 1.03, 1.14 และ 1.43 กิโลปาสกาล

3.4 การใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้า

จากตารางที่ 1 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิใน Day 1 (27/01/2566) ซึ่งมีอากาศเย็น ทำให้ระบบควบคุมไม่ได้ทำงานตลอดเวลาเหมือนกับ Day 2 (17/05/2566) และ Day 3 (03/06/2566) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงจึงทำให้ในวันที่ทดสอบนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่า โดยในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูงระบบทำงานตลอดเวลาทำให้ทั้งสองวันนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้น้ำ Day 2 (17/05/2566) มีการใช้น้ำที่เยอะกว่า Day 3 (03/06/2566) เนื่องจาก Day 2 (17/05/2566) มีสภาพอากาศที่แห้งกว่าจำเป็นที่จะใช้น้ำให้ระเหยเข้าสู่อากาศได้มากกว่าจึงทำให้มีการใช้น้ำที่มากกว่า

จากตารางที่ 2 การทดสอบการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน จะเห็นได้ว่าใน Day 1 (02/02/2566) ซึ่งมีอากาศแห้งจะมีการใช้น้ำที่สูงและมีการทำงานของระบบที่ยาวนานกว่าจึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่า Day 2 (13/02/2566) และ Day 3 (04/06/2566) ส่วนใน Day 3 (04/06/2566) ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่อนข้างสูงจึงทำให้มีการเติมน้ำเข้าไปในอากาศที่น้อยกว่าวันอื่นๆ จึงมีการใช้น้ำที่น้อยที่สุด แต่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับ Day 2 (13/02/2566)

จากตารางที่ 3 การทดสอบค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศจะเห็นได้ว่าใน Day 3 (22/03/2566) ซึ่งอากาศมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ ทำให้มีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่า Day 1 (19/03/2566) และ Day 2 (21/03/2566) ซึ่งอากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงกว่า

จากผลการทดสอบทั้งสามระบบจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในวันทดสอบที่มีอุณหภูมิสูงและ

ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ระบบควบคุมอุณหภูมิจะมีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเนื่องจากระบบทำงานตลอดเวลา ส่วนระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงมากที่สุดคือระบบควบคุมแรงดันระเหยน้ำของอากาศ ส่วนระบบที่มีการใช้พลังงานน้อยที่สุดก็คือระบบควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์

4. สรุป

จากการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน 2566 สรุปได้ว่าระบบควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนให้มีค่า 25 องศาเซลเซียส สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียสได้ ในวันที่อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นไม่สูงมากนัก ส่วนในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูง โรงเรือนไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิให้มีค่า 25 องศาเซลเซียสได้ แต่จะสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำกว่าภายนอกโรงเรือนได้ถึง 5-7 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนสามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนให้มีค่าประมาณร้อยละ 70 แต่ในขณะเดียวกันอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโรงเรือนมีค่าสูงอยู่ในช่วง 28-35 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในวันที่ทดสอบ ส่วนระบบควบคุมค่าแรงดันระเหยน้ำระบบสามารถควบคุมค่าแรงดันระเหยน้ำให้มีค่า 0.85 กิโลปาสกาลได้ในช่วงเวลา แต่ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันนั้นยังมีค่าสูงกว่า 0.85 กิโลปาสกาล ซึ่งค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชในโรงเรือนซึ่งมีค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส และร้อยละ 79 ตามลำดับ ซึ่งการควบคุมด้วย VPD มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุด หากต้องการลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำลงมากขึ้น อาจจะเพิ่มพัดลมระบายอากาศให้มีอัตราการถ่ายเทอากาศที่สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนเครื่องมือและพื้นที่ในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Thongket, *Growing plants in greenhouses*, Bangkok: Kasetsart University, 2007.
- [2] M. Soussi, M. T. Chaibi, M. Buchholz, and Z. Saghrouni, "Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions," *Agronomy*, vol. 12, no. 626, 2022.
- [3] C. Saowarat, "AUTOMATIC CLIMATE CONTROL IN GREENHOUSE BY FOGGING SYSTEM," M.Eng. thesis, Program in Mechanical and Process System, Suranaree Univ. of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2017.
- [4] K. Simek, "REDUCTION OF HEAT FROM SOLAR ENERGY FOR MISTING GREENHOUSE," M.Eng. thesis, Program in Mechanical and Process System Engineering, Suranaree Univ. of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2019.
- [5] I. Tsafaras, J. B. Campen, C. Stanghellini, H. F. de Zwart, W. Voogt, K. Scheffers, A. Harbi and K. Assaf, "Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions," *Agricultural Water Management*, vol. 250, 2021.

- [6] W. Baudoin, R. Nono-Womdim, N. Lutaladio, and A. Hodder, *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [7] S. Ghani, F. Bakochristou, E. M. Elbialy, S. M. Gamaledin, M. M. Rashwan, A. M. Abdelhalim and S. M. Ismail, "Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 12, no. 1, pp. 48-70, Jan. 2019.
- [8] I. Norkaew, "Energy Saving in Climatic Controlled Greenhouse with Evaporative cooling Using Excess Cool Water from Ice Factory," M.Eng. thesis, Graduate School, Chiang Mai Univ, Chiang Mai, Thailand, 2000.
- [9] A. Arble, O. Yekutieli, and M. Barak, "Performance of a Fog System for Cooling Greenhouses," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 72, no. 2, pp. 129-136, 1999.
- [10] C. Kittas, T. Bartzanas, and A. Jaffrin, "Temperature Gradients in a Partially Shaded Large Greenhouse equipped with Evaporative Cooling Pads," *Biosystems Engineering*, vol. 85, no. 1, pp. 87-94, 2003.
- [11] J. Xu, Y. Li, R. Z. Wang, W. Liu, and P. Zhou, "Experimental performance of evaporative cooling pad systems in greenhouses in humid subtropical climates," *Applied Energy*, vol. 138, pp. 291-301, Jan. 2015.
- [12] M. Sultan, T. Miyazaki, B. B. Saha, and S. Koyama, "Steady-state investigation of water vapor adsorption for thermally driven adsorption based greenhouse air-conditioning system," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 785-795, Feb. 2016.
- [13] M. Amani, S. Foroushani, M. Sultan, and M. Bahrami, "Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 181, Nov. 2020.
- [14] F. W. Murray, "On the computation of saturation vapor pressure," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 6, pp. 203-204, Feb. 1967.
- [15] *ASHRAE Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009.
- [16] H. Oz, A. Atilgan, K. Buyuktas, and T. Alagoz, "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, Oct. 2009.
- [17] M. Dayioglu and H. Silileli, "Performance Analysis of a Greenhouse Fan-Pad Cooling System: Gradients of Horizontal Temperature and Relative Humidity," *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 132-143, 2015.
- [18] I. M. A. Aljubury and H. D. Ridha, "Enhancement of evaporative cooling system in a greenhouse using geothermal

- energy,” *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 321-331, Oct. 2017.
- [19] A. Alsadon, I. Al-Helal, A. Ibrahim, A. Abdel-Ghany, S. Al-Zaharani, and T. Ashour, “The effects of plastic greenhouse covering on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth,” *Ecological Engineering*, vol. 87, pp. 305-312, Feb. 2016.