

## การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า

ปรีชา ทุมมู\* ธนากร กองบาง คมสัน มูลเพ็ญ และ วีรชาติ คงทวี  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

\* ผู้รับทุนประธานงาน โทรศัพท์ 0 4221 1040-59 ต่อ 3654 อีเมล: preecha.tu@udru.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.023  
รับเมื่อ 21 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 18 มิถุนายน 2563 ตอรับเมื่อ 19 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกและระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า วิธีการในการศึกษาเริ่มจากการศึกษาอุณหภูมิใต้ดินที่ระดับความลึก 3 ระดับ ของกลุ่มดิน 3 ประเภท ในเขตจังหวัดอุดรธานี ต่อมาจะทำการคำนวณออกแบบระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน และสร้างระบบจริงพร้อมกับโรงเรือนเพาะเห็ดขนาด 2.25 เมตร × 2.25 เมตร สูง 2.4 เมตร จากนั้นจะทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานของระบบ พร้อมทั้งมีการทดลองนำเห็ดนางฟ้ามาเพาะเลี้ยงจริงในระบบเปรียบเทียบกับโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิม ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิใต้ดินในเขตจังหวัดอุดรธานีมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 27–30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีศักยภาพในการใช้ระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน โดยความลึกที่เหมาะสมในการวางระบบอยู่ที่ 1.5–2 เมตร เนื่องจากมีอุณหภูมิคงที่ และไม่ได้รับอิทธิพลภายนอกอื่นๆ เมื่อทดลองติดตั้งระบบทำความเย็นใต้ดินที่ความลึกดังกล่าวพบว่า ระบบสามารถช่วยลดอุณหภูมิอากาศให้ต่ำกว่าอากาศภายนอกประมาณ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงกลางวัน ที่อากาศร้อนจัด โดยหากเพิ่มความเร็วลมในท่อจะมีผลเล็กน้อยในการช่วยอุ่นอากาศในช่วงที่อุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอุณหภูมิใต้ดิน และเมื่อนำระบบดังกล่าวไปใช้ร่วมกับโรงเรือนเพาะเห็ดที่สร้างขึ้นมาผลที่ได้พบว่า ที่ความเร็วลม 5.4 เมตรต่อวินาที จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำกว่าอากาศภายนอกได้ประมาณ 4 องศาเซลเซียส และสูงกว่าอุณหภูมิใต้ดินเพียง 0.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ความเร็วลมดังกล่าวจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศในโรงเรือนสูงที่สุด และเมื่อมีการติดตั้งระบบพ่นหมอกพร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงเรือนเพิ่มเติม จะสามารถช่วยรักษาความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนให้สูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ได้ตลอดเวลา ซึ่งเหมาะต่อการเพาะเห็ดนางฟ้าอย่างมาก ซึ่งเมื่อทำการทดลองนำเห็ดนางฟ้าจำนวน 400 ก้อน มาเพาะจริงเป็นเวลา 1 เดือน ในระบบเทียบกับการเพาะในโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมพบว่า ปริมาณดอกเห็ดที่ได้มีจำนวนมากกว่าโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมถึง 23 เปอร์เซ็นต์ และลดเหลือ 12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาต้นทุนในการสร้างโรงเรือนเพาะเห็ดร่วมกับเทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินที่เพิ่มขึ้นจากโรงเรือนดั้งเดิม นอกเหนือไปจากนี้ยังพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นมานี้มีศักยภาพสูงที่จะช่วยให้เกษตรกรสามารถเพาะเห็ดนอกฤดูกาลในช่วงที่อากาศร้อนได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** ระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน โรงเรือนเพาะเห็ด เห็ดนางฟ้า อุณหภูมิใต้ดิน พลังงานความร้อนใต้พิภพ

การอ้างอิงบทความ: ปรีชา ทุมมู, ธนากร กองบาง, คมสัน มูลเพ็ญ และ วีรชาติ คงทวี, “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 31, ฉบับที่ 4, หน้า 624–637, ต.ค.-ธ.ค. 2564.



## Applications of an Earth-air Heat Exchanger System for Temperature and Humidity Control in a *Pleurotus sajor-caju* Mushroom House

Preecha Tumm<sup>\*</sup>, Tanakorn Kongbang, Komsan Mulper and Weerachart Kongthawee  
Energy Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani, Thailand

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 0 4224 1040-59 ต่อ 3654, E-mail: preecha.tu@udru.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.023

Received 21 April 2020; Revised 18 June 2020; Accepted 19 June 2020; Published online: 25 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The purpose of this research is to study the application of an earth-air heat exchanger system to control temperature and humidity in a *Pleurotus sajor-caju* mushroom house. Firstly, this research conducted measurements of underground temperatures at three depth levels for three soil groups in Udon Thani. Secondly, the calculation of the earth-air heat exchanger system was implemented for a 2.25 m × 2.25 m and 2.4 m high mushroom house and the real system was constructed. Finally, experiments on the performance test of the system were conducted, including mushroom cultivation experiments. The results of this research show that the underground temperature in Udon Thani is around 27–30°C and is a great potential use for the earth-air heat exchanger system at 1.5–2 m deep. The performance test of the system shows that the temperature can be reduced by 5°C from ambient temperature during warm temperature in the daytime. At the air supply speed of 5.4 m/s and underground temperature at 29°C, the mushroom house temperature can be reduced by 4°C, and the temperature gap between the air supply outlet and the underground was only 0.5°C because the air supply speed possesses the highest heat transfer rate. After installing a fogging system, including an automatic control system, the system can maintain relative humidity in the mushroom house above 80 percent, which is suitable for mushroom cultivation. Apart from that, the cultivation test of 400 mushroom cubes was conducted in the mushroom house compared with a traditional mushroom house. It is found that mushroom quantity received is higher than that of the cultivation in the conventional mushroom for 23 percent. However, it is reduced to 12 percent when considering installation cost of the underground temperature system. In conclusion, the use of the earth-air heat exchanger system with the mushroom house can help farmers in mushroom cultivation during the off-season.

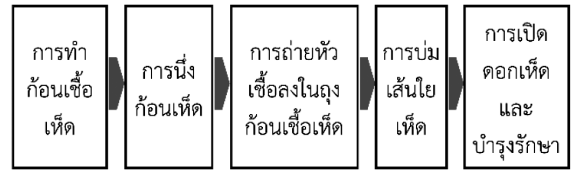
**Keywords:** Earth-air Heat Exchanger, Mushroom Houses, *Pleurotus sajor-caju*, Underground Temperature, Geothermal Energy

Please cite this article as: P. Tumm, T. Kongbang, K. Mulper, and W. Kongthawee, "Applications of an earth-air heat exchanger system for temperature and humidity control in a *Pleurotus sajor-caju* mushroom house," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 624–637, Oct.–Dec. 2021 (in Thai).

## 1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม โดยมีรายงานว่ามีการจ้างงานในภาคเกษตรกรรมคิดเป็นประมาณร้อยละ 40 ของการจ้างงานทั้งประเทศในช่วงระหว่าง พ.ศ. 2550-2559 และผลผลิตทางการเกษตรของไทยมีมูลค่าคิดเป็นประมาณร้อยละ 10 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (Gross Domestic Product; GDP) [1] โดยผลผลิตหลักทางการเกษตร 3 อันดับแรก คือ อ้อย ข้าว และมันสำปะหลัง ในปัจจุบันเกษตรกรบางส่วนได้มีการทำการเกษตรรูปแบบผสมผสานเพื่อให้มีรายได้ตลอดทั้งปีในช่วงที่รอผลผลิตทางการเกษตรหลัก ซึ่งการเพาะเห็ดเป็นหนึ่งในอาชีพเสริมที่ได้รับความนิยมจากเกษตรกร โดยปัจจุบันมีวิสาหกิจเพาะเห็ดในประเทศไทยมากถึง 1,547 แห่ง [2] โดยเห็ดที่นิยมเพาะเลี้ยงในประเทศไทย ได้แก่ เห็ดนางฟ้า เห็ดขอนขาว-ขอนดำ เห็ดอบเห็ดนางรม เห็ดเป่าฮื้อ เห็ดฮังการี เห็ดหูหนู เห็ดตีนแรด และเห็ดโคนญี่ปุ่น เป็นต้น [3] ซึ่งวิธีการเพาะปลูกเห็ดที่ได้รับความนิยม คือ การเพาะเห็ดในถุงพลาสติก ซึ่งมีกระบวนการหลักทั้งหมด 5 ขั้นตอน โดยเริ่มจากขั้นตอนการทำก้อนเชื้อเห็ด ซึ่งจะเป็นการนำวัสดุเพาะ ได้แก่ ขี้เลื่อยหรือฟางข้าว มาผสมกับส่วนผสมอื่นๆ แล้วนำไปบรรจุลงถุงพลาสติก ทนร้อน จากนั้นนำก้อนเห็ดไปทำการนึ่งด้วยชุดเครื่องนึ่งเป็นเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง แล้วทำการถ่ายหัวเชื้อลงในถุงก้อนเชื้อ จากนั้นนำก้อนเห็ดที่ได้ไปบ่มในโรงเรือนที่สะอาดและอากาศถ่ายเทสะดวกประมาณ 30 วัน แล้วย้ายก้อนเห็ดไปที่โรงเพาะเห็ดเพื่อเปิดดอกตัดจำหน่ายและบำรุงรักษา ดังที่แสดงดังรูปที่ 1

ซึ่งในขั้นตอนเปิดดอกเห็ดจะมีปัญหาที่สำคัญมากคือ เห็ดจะไม่สามารถออกดอกได้ในช่วงที่อากาศร้อนเกินไป เนื่องจากเห็ดส่วนใหญ่จะชอบอากาศที่ค่อนข้างเย็น ซึ่งมีการวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้า (*Pleurotus sajor-caju*) ควรต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ควรอยู่ระหว่าง 70-90 เปอร์เซ็นต์ และความสว่างประมาณ 200 ลักซ์ [4]-[8] และหากอุณหภูมิสูงถึง 40 องศาเซลเซียส จะทำให้เชื้อเห็ดหยุดการเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ [9]



รูปที่ 1 กระบวนการเพาะเห็ดแบบดั้งเดิม

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาการควบคุมสภาพภายในโรงเห็ดโดยใช้ระบบการทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling Systems) ซึ่งผลที่ได้พบว่า การใช้ระบบดังกล่าวร่วมกับระบบระบายอากาศต่อเนื่องสามารถช่วยลดอุณหภูมิในโรงเรือนให้ต่ำกว่าการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติได้ประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส และขณะเดียวกันก็สามารถช่วยเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และการไหลเวียนอากาศที่เหมาะสมอยู่ที่ 10 จำนวนรอบการไหลเวียนอากาศ (Air Change per Hour; ACH) [10] เทคโนโลยีการทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำส่วนใหญ่จะถูกใช้ในประเทศที่อุณหภูมิอากาศค่อนข้างสูง โดยจะถูกใช้สำหรับการลดอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะปลูกพืช ซึ่งในบางประเทศสามารถช่วยลดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 20 องศาเซลเซียส และช่วยเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงสุดประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ [11]-[13] นอกเหนือจากเทคโนโลยีดังกล่าว มีอีกหนึ่งเทคโนโลยีการทำความเย็นซึ่งมีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมสภาพภายในโรงเรือน นั่นคือ ระบบการทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน (Earth-air Heat Exchanger; EAHE) โดยเทคโนโลยีดังกล่าวเป็นการนำท่อฝังไว้ใต้ดินแล้วนำอากาศไหลผ่านท่อเพื่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ ซึ่งในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยจะมีอุณหภูมิใต้ดินที่ต่ำกว่าอากาศภายนอกเกือบตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวัน โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า อุณหภูมิใต้ดินของประเทศไทยจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 28-30 องศาเซลเซียสตลอดทั้งปี แต่ที่ความลึกมากขึ้น อุณหภูมิใต้ดินจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิของแกนโลก [14] สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าที่ความลึกระดับ 1 เมตร อุณหภูมิใต้ดินในพื้นที่ดังกล่าวมี

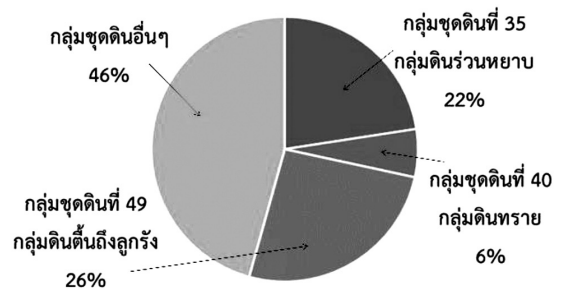
อุณหภูมิประมาณ 29 องศาเซลเซียส และเมื่อนำระบบการทำความเย็นแบบท่อใต้ดินแบบตัวยู (U-tube Heat Exchanger) ซึ่งใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 0.08 เมตร และความยาวท่อรวม 15.4 เมตร ไปติดตั้ง จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกได้สูงสุดประมาณ 4 องศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิขณะทำการทดลองจะอยู่ที่ประมาณ 25–35 องศาเซลเซียส [15] นอกเหนือไปจากนี้ ได้มีการศึกษาการนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศและระบบฮีตปั๊ม (Heat Pump) โดยมีการแลกเปลี่ยนความร้อนใต้ดินช่วยในการระบายความร้อน ซึ่งพบว่า สามารถช่วยลดพลังงานได้มากถึง 18 เปอร์เซ็นต์ [16], [17] สำหรับในต่างประเทศได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวนี้ ไปใช้ในการสร้างความสบายเชิงอุณหภูมิในบ้านที่อยู่อาศัย โดยผลการศึกษาพบว่า ระบบดังกล่าวสามารถช่วยลดอุณหภูมิในบ้านที่อยู่อาศัยได้เกือบ 10 องศาเซลเซียส ในสภาพอากาศแบบเมดิเตอร์เรเนียน [18]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกและระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า วิธีการในการศึกษาเริ่มจากการศึกษาอุณหภูมิใต้ดินที่ระดับความลึก 3 ระดับ ของกลุ่มดิน 3 ประเภท ในเขตจังหวัดอุดรธานี จากนั้นคำนวณออกแบบระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินและสร้างระบบจริงพร้อมโรงเรือนเพาะเห็ด แล้วจะทำการศึกษามรรณณะการทำงานของระบบ พร้อมทั้งมีการทดลองนำเห็ดนางฟ้ามาเพาะเลี้ยงจริงในโรงเรือนที่ติดตั้งระบบที่พัฒนาขึ้นมา

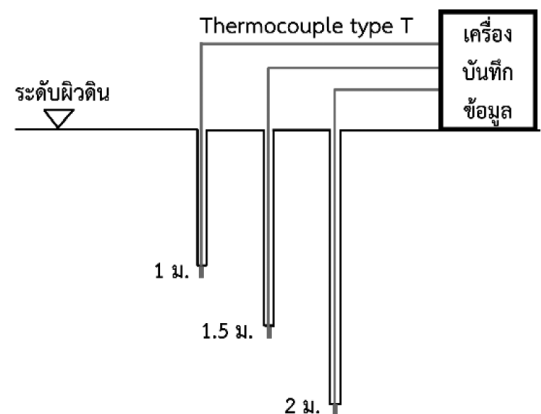
## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การศึกษาอุณหภูมิใต้ดินในเขตจังหวัดอุดรธานี

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาอุณหภูมิใต้ดิน ของกลุ่มดินชนิดต่างๆ ที่ความลึก 3 ระดับ ในเขตจังหวัดอุดรธานี โดยชนิดของดินในจังหวัดอุดรธานีแบ่งออกเป็น 29 ประเภท [19] โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอุณหภูมิใต้ดินของดิน 3 กลุ่ม คือ กลุ่มดินที่ 35 กลุ่มดินร่วนหยาบ กลุ่มดินที่ 40 กลุ่มดินทราย และกลุ่มดินที่ 49 กลุ่มดินดินถึงลูกรัง โดยชนิดกลุ่มดินทั้ง



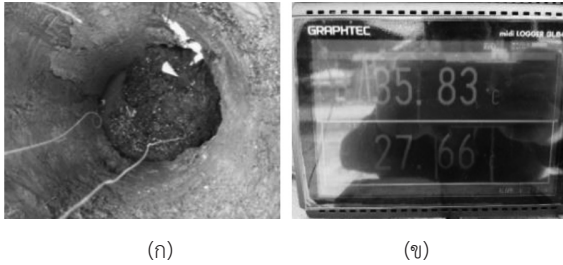
รูปที่ 2 สัดส่วนของชนิดกลุ่มดินในจังหวัดอุดรธานี



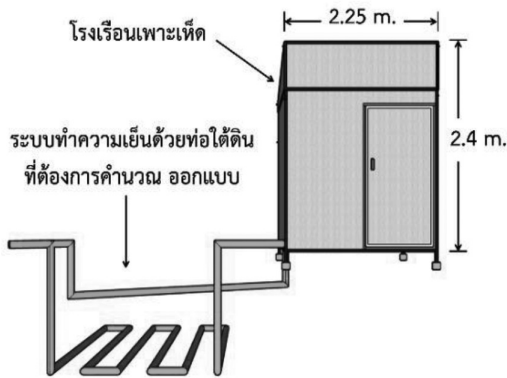
รูปที่ 3 วิธีการวัดอุณหภูมิใต้ดินที่ความลึกระดับต่างๆ 3 ประเภท คิดเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ของชนิดกลุ่มดินทั้งหมด ดังที่แสดงในรูปที่ 2

3 ประเภท คิดเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ของชนิดกลุ่มดินทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2

โดยจะทำการวัดอุณหภูมิใต้ดินที่ความลึก 3 ระดับ คือ ที่ระดับความลึก 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะทำการวัดอุณหภูมิใต้ดินโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type T) โดยจะทำการฝังหัววัดลงไปในดินจุดใต้สุดของหลุม [รูปที่ 4 (ก)] ซึ่งสายเทอร์โมคัปเปิลจะเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องบันทึกข้อมูลชื่อ GRAPHTEC รุ่น GRAPHTEC Midi Logger GL840 [รูปที่ 4 (ข)] ซึ่งเมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดเสร็จแล้วจะมีการนำฉนวนหามาปิดหลุมเพื่อป้องกันอิทธิพลจากแสงแดดและอุณหภูมิภายนอก และจะทำการบันทึกข้อมูลเป็นรายนาฬิกาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4 วิธีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและเครื่องบันทึกข้อมูล



รูปที่ 5 รูปแบบโรงเรือนเพาะเห็ดและระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในการทดลองแต่ละครั้ง

## 2.2 การคำนวณขนาดระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณหาขนาดของระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินสำหรับใช้ร่วมกับโรงเรือนเพาะเห็ดขนาด 2.25 เมตร x 2.25 เมตร สูง 2.4 เมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 5

โดยจะคำนวณโดยใช้วิธีตามหลักการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวมีค่าคงที่ [20] และวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [21] ซึ่งเริ่มจากการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลในท่อใต้ดินโดยใช้จากสมการที่ (1)

$$\dot{m}_{air} = \rho \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) V \quad (1)$$

โดย  $\dot{m}_{air}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, กิโลกรัมต่อ

วินาที

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, เมตร

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$V$  คือ ความเร็วลมในท่อ, เมตรต่อวินาที

จากนั้นนำอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ได้มาทำการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ ( $Q_{tube}$ ) ได้จากสมการที่ (2) ซึ่งเป็นความร้อนที่อากาศต้องถ่ายเทให้แก่ระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน

$$Q_{tube} = \dot{m}_{air} C_p (T_i - T_e) \quad (2)$$

โดย  $Q_{tube}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อ, วัตต์

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อเคลวิน

$T_i$  คือ อุณหภูมิอากาศขาเข้าท่อ, องศาเซลเซียส

$T_e$  คือ อุณหภูมิอากาศขาออกท่อ, องศาเซลเซียส

ต่อมาทำการคำนวณหาเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลของอากาศโดยใช้สมการที่ (3) โดยหากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงกว่า 2,300 จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) จากนั้นหาคำนวนหาความสัมพันธ์ความเสียดทานระหว่างผิวท่อและอากาศ ( $f$ ) โดยในการศึกษานี้ได้กำหนดให้การไหลในท่อเป็นแบบปั่นป่วนเพื่อให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวท่อและอากาศในท่อสูงจึงใช้สมการที่ (4) และคำนวณหา Nusselt Number ( $Nu$ ) โดยใช้สมการที่ (5)

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (3)$$

โดย  $Re$  คือ Reynolds number

$\mu$  คือ Dynamic Viscosity, กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที

$\nu$  คือ Kinematic Viscosity, ตารางเมตรต่อวินาที

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (4)$$

โดย  $f$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวท่อและอากาศ

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \begin{cases} 0.5 \leq Pr \leq 2000 \\ 3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6 \end{cases} \quad (5)$$

โดย  $N_u$  คือ Nusselt Number

$P_r$  คือ Prandtl Number

จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ( $k_{air}$ ) โดยใช้สมการที่ (6) แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ( $h$ ) โดยใช้สมการที่ (7)

$$k_{air} = 0.02442 + (10^{-4} (0.6992 \times T_a)) \quad (6)$$

โดย  $T_a$  คือ อุณหภูมิอากาศ, องศาเซลเซียส

$$h = \frac{Nuk_{air}}{D} \quad (7)$$

โดย  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ วัดต่อตารางเมตร ต่อองศาเซลเซียส

ต่อมาคำนวณหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย (Log-mean Temperature Difference; LMTD) โดยใช้สมการที่ (8)

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_e / \Delta T_i)} \quad (8)$$

โดย  $\Delta T_{lm}$  คือ Log-mean Temperature Difference

$$\Delta T_e = T_e - T_s$$

$$\Delta T_i = T_i - T_s$$

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิวของท่อ, องศาเซลเซียส

จากนั้นคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในของท่อทั้งหมด ( $A_s$ ) โดยใช้สมการที่ (9) และจะสามารถคำนวณหาความยาวที่เหมาะสมของระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน ( $L$ ) ได้โดยใช้สมการที่ (10)

$$A_s = \frac{\dot{Q}}{h\Delta T_{lm}} \quad (9)$$

โดย  $A_s$  คือ พื้นที่ผิวภายในของท่อทั้งหมด, ตารางเมตร

$$L = \frac{A_s}{\pi D} \quad (10)$$

โดย  $L$  คือ ความยาวท่อ, เมตร

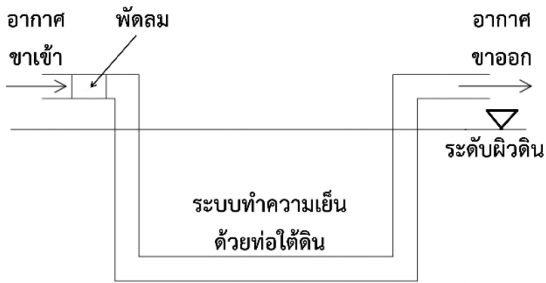
ซึ่งค่าตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณขนาดระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินของงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1 โดยผู้วิจัยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 0.1 เมตร เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมที่จะได้อัตราการไหลที่เพียงพอต่อการควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนและได้ความยาวท่อและขนาดพัดลมที่เหมาะสม และเลือกใช้ความเร็วลมในท่อเป็น 1 เมตรต่อวินาที เนื่องจากเป็นความเร็วลมต่ำที่สุดที่เกิดการไหลแบบปั่นป่วนในท่อ และกำหนดอุณหภูมิขาเข้าท่อเป็น 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิอากาศสูงสุดในหน้าร้อน และใช้อุณหภูมิขาออกท่อเป็น 29 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เท่ากับอุณหภูมิใต้ดินที่วัดได้ซึ่งเป็นอุณหภูมิอากาศต่ำที่สุดที่ระบบจะทำได้ และใช้อุณหภูมิผิวภายในท่อเท่ากับอุณหภูมิใต้ดิน เนื่องจากผนังท่อบางมากจึงทำให้การนำความร้อนระหว่างดินและผิวท่อสูงจนสามารถรักษาอุณหภูมิผิวท่อให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิใต้ดิน

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณขนาดระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความเร็วลมในท่อ ( $V$ )	1	m/s
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ( $D$ )	0.1	m
อุณหภูมิอากาศขาเข้าท่อ ( $T_i$ )	40	°C
อุณหภูมิอากาศขาออกท่อ ( $T_e$ )	29	°C
อุณหภูมิผิวของท่อ ( $T_s$ )	ใช้ค่าอุณหภูมิใต้ดิน	°C

### 2.3 การศึกษาสมรรถนะระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน

การศึกษสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้



รูปที่ 6 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมในท่อต่ออุณหภูมิอากาศขาออกท่อ

### 2.3.1 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมในท่อต่ออุณหภูมิอากาศขาออกท่อ

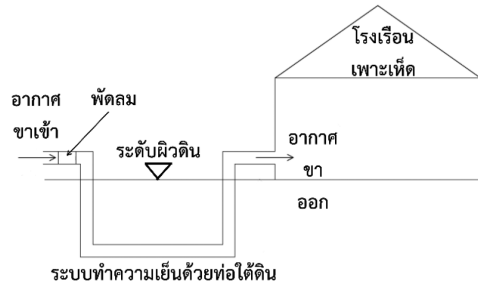
ซึ่งจะเป็นการศึกษาเพื่อหาความเร็วลมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้อุณหภูมิอากาศออกจากระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินมีอุณหภูมิต่ำที่สุด โดยวิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะมีการทดลองที่ความเร็วลม 3 ระดับ คือ 2, 3 และ 5.4 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมสูงสุดที่พัดลมสามารถทำได้ โดยจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วลมในท่อ พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศเข้าและออกจากระบบโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลและเครื่องบันทึกข้อมูล

### 2.3.2 การศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน

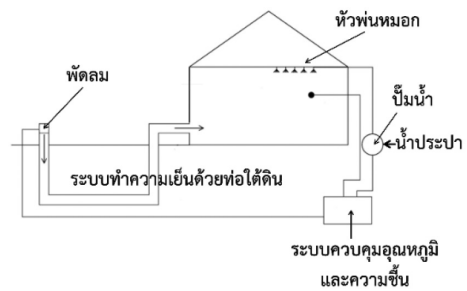
ซึ่งจะเป็นการวัดอุณหภูมิภายในโรงเพาะเห็ดเมื่อมีการติดตั้งระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน ดังที่แสดงในรูปที่ 7 และจะมีการแปรความเร็วลม 3 ระดับ เช่นเดียวกับหัวข้อ 2.3.1 โดยจะมีการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิความชื้นภายนอกและภายในโรงเห็ด และเซนเซอร์วัดความเร็วลมในท่อ

### 2.3.3 การศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกและระบบควบคุมอัตโนมัติ

ซึ่งจะเป็นการศึกษาในรูปแบบเดียวกับหัวข้อ 2.3.2 แต่จะมีการติดตั้งระบบพ่นหมอกพร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติเพิ่มเข้ามาในระบบดังที่แสดงในรูปที่ 8 โดยระบบควบคุมอัตโนมัติจะมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น โดยหากอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าที่กำหนด (30 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 7 การศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน



รูปที่ 8 การศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกอัตโนมัติ

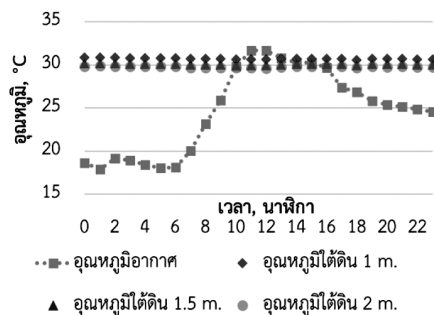
ระบบจะสั่งการให้พัดลมของระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินทำงาน และหากความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนต่ำกว่าที่กำหนด (80 เปอร์เซ็นต์) ระบบจะสั่งการให้ระบบพ่นหมอกทำงานโดยอัตโนมัติ นอกจากนี้จะมีการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณเห็ดที่ได้จากโรงเห็ดที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินพร้อมระบบพ่นหมอกอัตโนมัติ กับโรงเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมที่ใช้วิธีการรดน้ำบนก้อนเห็ด และพื้นโรงเห็ดเพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นในโรงเห็ด

## 3. ผลการทดลอง

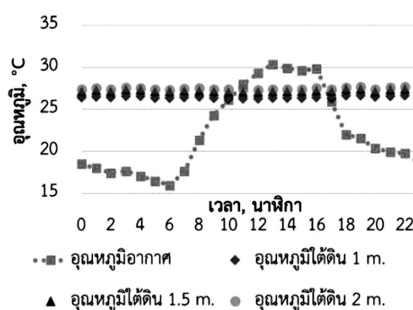
### 3.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิใต้ดิน

จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิใต้ดินของ 3 กลุ่มดิน ที่ความลึก 3 ระดับ ในเขตจังหวัดอุดรธานี ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.1 พบว่า อุณหภูมิใต้ดินของกลุ่มดินที่ 49 กลุ่มดินตื้นถึงลูกรัง ที่ระดับความลึก 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 30.72, 30.08 และ 29.77

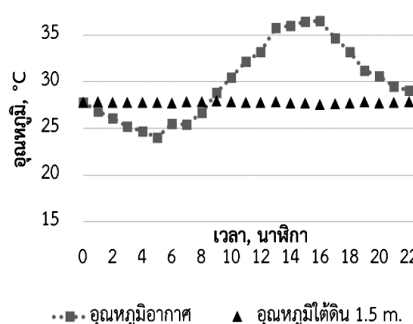
องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งที่ความลึกแต่ละระดับจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดเวลา ไม่แปรตามปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิอากาศภายนอก และรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 0.07 องศาเซลเซียส ดังที่แสดงในรูปที่ 9 และยังพบว่า ที่ระดับความลึกที่มากขึ้น จาก 1 เมตร เป็น 2 เมตร จะมีอุณหภูมิที่ต่ำลงประมาณ 1 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่า อุณหภูมิใต้ดินจะลดลงเรื่อยๆ ที่ระดับความลึกที่มากขึ้น แล้วจะกลับสูงขึ้นอีกครั้งที่ความลึกมากกว่า 20 เมตร เนื่องจากความร้อนของแกนกลางโลก [14] สำหรับกลุ่มดินที่ 35 กลุ่มดินร่วนหยาบ พบว่า ที่ระดับความลึก 3 ระดับดังกล่าว จะมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิใต้ดิน 26.45, 27.25 และ 27.47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 0.11 องศาเซลเซียส และจะมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า กลุ่มดินที่ 49 ประมาณ 2 องศาเซลเซียส ดังที่แสดงในรูปที่ 10 และจะเห็นได้ว่าจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ระดับความลึกที่มากขึ้นเล็กน้อย ซึ่งตรงกันข้ามกับผลที่ได้จากกลุ่มดินต้นถึงลูกรัง ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์พบว่า กลุ่มดินร่วนหยาบจะมีช่องว่างน้อยกว่ากลุ่มดินต้นถึงลูกรัง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงกว่า ขณะที่การเก็บผลการทดลองอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศอยู่ที่ 22.31 องศาเซลเซียส ซึ่งค่อนข้างเย็น ดังนั้นที่ระดับความลึกที่น้อยกว่า อุณหภูมิใต้ดินจึงยังได้รับอิทธิพลของอากาศที่เย็นภายนอกทำให้มีอุณหภูมิใต้ดินที่ต่ำกว่าระดับที่ลึกกว่า และสำหรับกลุ่มดินที่ 40 กลุ่มดินทราย ซึ่งกลุ่มดินนี้จะมีการวัดอุณหภูมิใต้ดินที่ความลึกเดียวที่ 1.5 เมตร เนื่องจากข้อจำกัดในการขุดและการวัด โดยค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิใต้ดินอยู่ที่ 27.81 องศาเซลเซียส และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 0.09 องศาเซลเซียส ดังที่แสดงในรูปที่ 11 ซึ่งผลจากการวัดสำหรับทุกชนิดดินที่กล่าวมาจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิใต้ดินของประเทศไทยที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ในหลายภูมิภาคของประเทศไทย [14] โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ระดับความลึก 1.5 เมตร ในการวางระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน เนื่องจากมีอุณหภูมิที่เหมาะสม และเพื่อสำหรับการติดตั้งระบบอื่นๆ เพิ่มเติมบนผิวดินในอนาคต



รูปที่ 9 อุณหภูมิใต้ดินสำหรับกลุ่มดินที่ 49 กลุ่มดินต้นถึงลูกรัง



รูปที่ 10 อุณหภูมิใต้ดินสำหรับกลุ่มดินที่ 35 กลุ่มดินร่วนหยาบ



รูปที่ 11 อุณหภูมิใต้ดินสำหรับกลุ่มดินที่ 40 กลุ่มดินทราย

### 3.2 ผลการคำนวณขนาดระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน

โรงเรือนเพาะเห็ดขนาด 2.25 เมตร × 2.25 เมตร สูง 2.4 เมตร ได้ถูกสร้างจริงโดยใช้ผนังและหลังคาเมทัลชีท (Metal Sheet) ซึ่งมีฉนวนหนา 1 นิ้ว และภายในมีการติดตั้งสมาร์ทบอร์ดหนา 0.9 เซนติเมตร เพื่อป้องกันความร้อน





(ก)

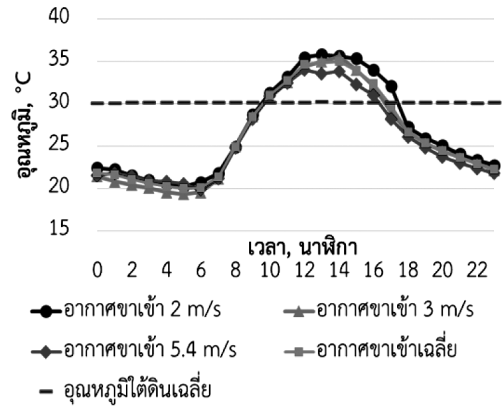
(ข)

รูปที่ 12 โรงเรือนเพาะเห็ดและระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินที่สร้างจริง

เข้าสู่โรงเห็ด ดังแสดงในรูปที่ 12 (ก) ณ พื้นที่ด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี (ศูนย์การศึกษาสามพร้าว) ซึ่งชนิดดินในพื้นที่ดังกล่าวเป็นกลุ่มดินที่ 49 กลุ่มดินต้นถึงลูกรัง และมีการสร้างระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน ดังแสดงในรูปที่ 12 (ข) โดยระบบดังกล่าวสร้างตามวิธีการคำนวณในหัวข้อ 2.2 โดยกำหนดตัวแปรตามตารางที่ 1 และผลที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2 โดยจะทำการขุดดินลึก 1.5 เมตร ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในผลการศึกษาในหัวข้อ 3.1 เพื่อวางท่อพีวีซีขนาด 4 นิ้ว ยาว 4 เมตร จำนวน 6 เส้น และใช้พัดลมขนาด 4 นิ้ว 70 วัตต์ ในการส่งลมผ่านท่อ

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณขนาดระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
Reynolds Number	$R_e$	5,946	-
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวท่อและอากาศ	$f$	0.021	-
Nusselt Number	$N_u$	10.77	-
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ	$k_{air}$	0.027	W/(m <sup>2</sup> ·°C)
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ	$h$	2.894	W/(m <sup>2</sup> ·°C)
ความยาวท่อ	$L$	24.6	m
ความลึกในการวางท่อ	-	1.5	m
ระยะห่างระหว่างท่อ	-	0.6	m



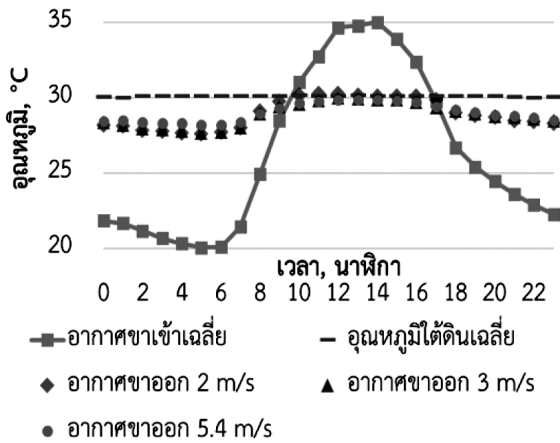
รูปที่ 13 อุณหภูมิอากาศเข้าของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินที่ความเร็วลมต่างๆ และความเร็วลมเฉลี่ย

### 3.3 ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดิน

3.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมในต่ออุณหภูมิอากาศออกท่อ

ขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินตามขั้นตอนในหัวข้อ 2.3.1 โดยทำการทดลองในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ซึ่งอากาศช่วงกลางคืนค่อนข้างหนาว โดยช่วงที่ทำการทดลองจะอยู่ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน ทำให้อุณหภูมิอากาศเข้าระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินมีค่าใกล้เคียงกันดังที่แสดงในรูปที่ 13 โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิใต้ดินที่ระดับความลึก 1.5 เมตร มีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออกของระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินเมื่อแปรความเร็วลมทั้ง 3 ระดับ พบว่าในช่วงกลางวันอุณหภูมิอากาศสูงกว่าอุณหภูมิใต้ดิน (ช่วงเวลา 09:00–17:00 น.) อุณหภูมิอากาศออกของระบบทำความเย็นของความเร็วลมทั้ง 3 ระดับ จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิใต้ดิน และต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกได้สูงสุดถึง 5 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 14 (จากกราฟอุณหภูมิขาท่อในช่วงเวลา 10:00–



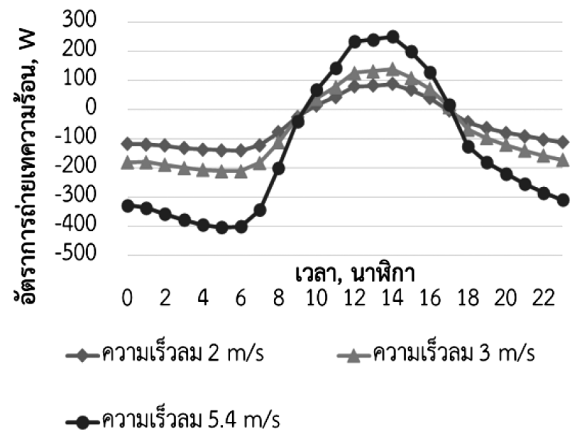
รูปที่ 14 การเปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกของระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินที่ความเร็วลมต่างๆ

17:00 น. จะต่ำกว่าอุณหภูมิใต้ดินเล็กน้อยประมาณ 0.2–0.5 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากค่าความแม่นยำของเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำ  $\pm 1$  องศาเซลเซียส) แต่หากพิจารณาในช่วงที่อุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอุณหภูมิใต้ดิน (ช่วงกลางคืน) จะพบว่าที่ความเร็วลมที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของอากาศขาออกมีค่าที่สูงขึ้นเล็กน้อยโดยจะมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิใต้ดิน ซึ่งจะเป็นการช่วยอุ่นอากาศ

เมื่อพิจารณาที่ความเร็วลม 2, 3 และ 5.4 เมตรต่อวินาทีพบว่า จะได้อัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่ 0.018, 0.027 และ 0.049 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวภายในท่อและอากาศ ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ (2) ผลที่ได้พบว่า ที่ความเร็วลมที่สูงขึ้นจะมีอัตราอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นด้วย ดังที่แสดงในรูปที่ 15 โดยในช่วงที่อุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอุณหภูมิใต้ดินอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นลบเนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าต่ำกว่าขาออก และจะมีค่าเป็นบวกเมื่ออุณหภูมิใต้ดินสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ

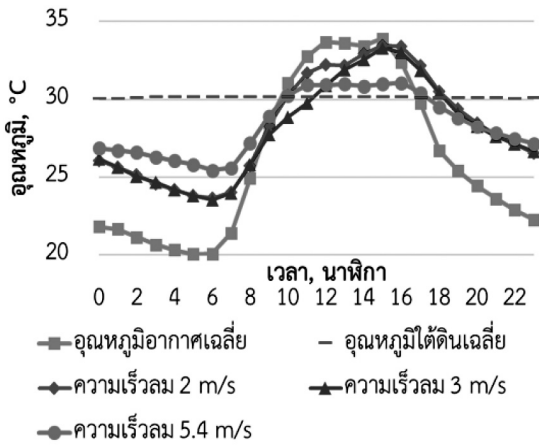
3.3.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินในการควบคุมสภาวะโรงเห็ด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการต่อระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินเข้ากับโรงเรือนเพาะเห็ดที่ตั้งที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.3.2 และจะมีการแปรความเร็วลม 3 ระดับ ผลจากการวัดอุณหภูมิ

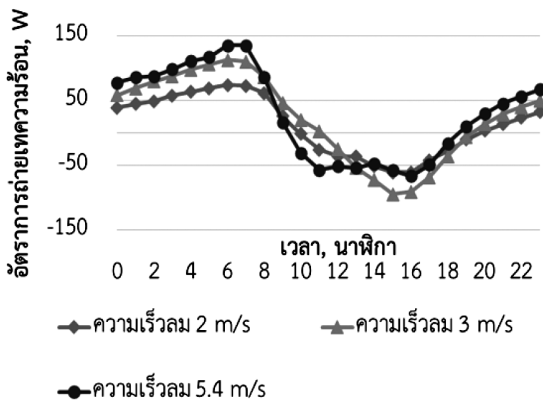


รูปที่ 15 อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวภายในท่อและอากาศที่ความเร็วลมต่างๆ

ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดแสดงดังรูปที่ 16 โดยพบว่า ที่ความเร็วลม 5.4 เมตรต่อวินาที เป็นความเร็วลมที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเห็ดในช่วงกลางวันที่อุณหภูมิอากาศสูงกว่าอุณหภูมิใต้ดิน (ช่วงเวลา 10:00–17:00 น.) ได้สูงสุดถึง 4 องศาเซลเซียส และสูงกว่าอุณหภูมิใต้ดินประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา [15] และในช่วงที่อุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอุณหภูมิใต้ดินจะพบว่า ที่ความเร็วลมดังกล่าวจะช่วยทำให้โรงเห็ดไม่เย็นจนเกินไป โดยสามารถทำให้อากาศในโรงเรือนอุ่นกว่าอากาศภายนอกประมาณ 5–6 องศาเซลเซียส และสำหรับที่ความเร็วลม 2 และ 3 เมตรต่อวินาที พบว่า ยังไม่สามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนได้ดีเพียงพอ ทั้งนี้ เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลงด้วย จึงไม่สามารถจัดการกับภาระการทำความเย็นของโรงเรือนเพาะเห็ดได้ดีเท่าที่ควร ดังที่แสดงในรูปที่ 17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วลมที่สูงขึ้นจะช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศในโรงเรือนเพาะเห็ดสูงขึ้น ทั้งในช่วงที่อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิใต้ดิน โดยที่ความเร็วลม 5.4 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลา 10:30–16:00 น. อัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อนข้างคงที่ เนื่องจากจากระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิในโรงเห็ดได้ต่ำ และคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าความเร็วลม 2



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพาะเห็ดที่ความเร็วลมจากระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินต่างๆ



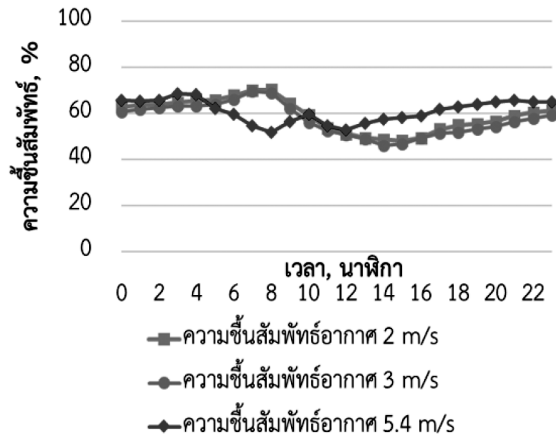
รูปที่ 17 อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศในโรงเรือนเพาะเห็ดที่ความเร็วลมต่างๆ

และ 3 เมตรต่อวินาที ในบางช่วงเวลา

นอกจากนี้ยังพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดที่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50-70 เปอร์เซ็นต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 18 ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวยังไม่เหมาะสมเท่าที่ควรในการเพาะเห็ดเมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [5]-[9], [22]

3.3.3 ผลการศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกอัตโนมัติ

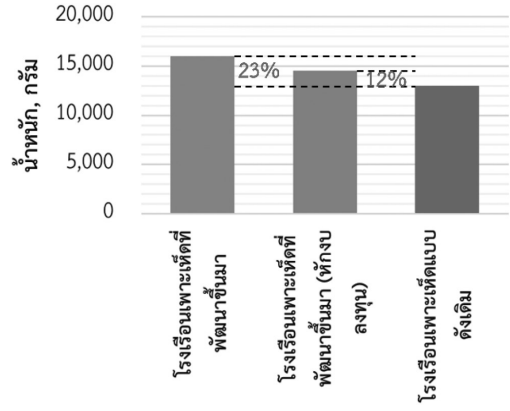
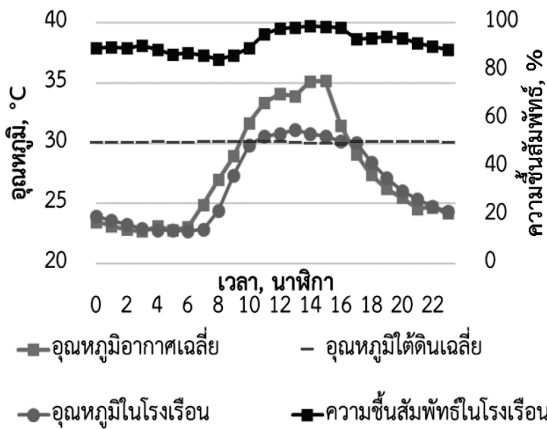
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดที่ความเร็วลมจากระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินต่างๆ กัน

แต่จะมีการติดตั้งระบบพ่นหมอกและระบบควบคุมอัตโนมัติเพิ่มเติมในโรงเรือน โดยระบบควบคุมอัตโนมัติจะมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และหากค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าค่าที่กำหนด (งานวิจัยนี้กำหนดที่ 30 องศาเซลเซียส) ระบบควบคุมจะสั่งให้พัดลมของระบบทำความเย็นใต้ดินทำงานเพื่อช่วยลดอุณหภูมิ และหากความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าค่าที่กำหนด (งานวิจัยนี้กำหนดที่ 80 เปอร์เซ็นต์) ระบบควบคุมจะสั่งให้ปั้มน้ำและวาล์วน้ำของระบบพ่นหมอกภายในโรงเรือนทำงานซึ่งจะช่วยเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งผลจากการใช้ระบบดังกล่าวพบว่า นอกจากจะสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิใต้ดินที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส แล้วยังสามารถช่วยรักษาความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในโรงเรือนเพาะเห็ดได้สูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ตลอดเวลา ดังที่แสดงในรูปที่ 19

เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการเพาะเห็ดแล้ว จึงมีการทดลองนำก้อนเห็ดนางฟ้าที่พร้อมเปิดดอกมาทดลองเพาะจริงในโรงเรือนเพาะเห็ดที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินพร้อมระบบพ่นหมอกอัตโนมัติจำนวน 200 ก้อน และนำก้อนเห็ดจากแหล่งผลิตและรอบผลิตเดียวกันอีก 200 ก้อน ไปทดลองเพาะในโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิม ดังที่แสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 19 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเพาะเห็ดเมื่อมีระบบทำความเย็นด้วยท่อใต้ดินร่วมกับระบบพ่นหมอกอัตโนมัติ

รูปที่ 21 การเปรียบเทียบปริมาณดอกเห็ดที่ซึ่งเพาะจากโรงเห็ดที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินพร้อมระบบพ่นหมอกอัตโนมัติ กับโรงเพาะเห็ดแบบดั้งเดิม



รูปที่ 20 โรงเห็ดที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินพร้อมระบบพ่นหมอกอัตโนมัติ และโรงเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อพิจารณาต้นทุนในการสร้างโรงเรือนเพาะเห็ดร่วมกับเทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินที่เพิ่มขึ้นจากโรงเรือนดั้งเดิมประมาณ 35,000 บาท พิจารณาที่อายุการใช้งานโรงเรือน 20 ปี เมื่อคิดเฉลี่ยค่าใช้จ่ายเป็นรายเดือนและเทียบเป็นปริมาณเห็ดที่ลดลงจะทำให้ปริมาณเห็ดที่ได้มากกว่ากว่าโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมเหลือ 12 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากการที่โรงเรือนเพาะเห็ดที่พัฒนาขึ้นมาช่วยเพิ่มปริมาณดอกเห็ดที่เก็บได้แล้ว ยังพบอีกว่า โรงเรือนเพาะเห็ดที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินมีศักยภาพอย่างสูงที่จะช่วยเกษตรกรในการเพาะเห็ดให้ออกนอกฤดูกาลในช่วงอากาศร้อน ซึ่งโรงเรือนแบบดั้งเดิมจะไม่สามารถเพาะได้ในช่วงดังกล่าวเนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่สูงเกินไป อีกทั้งยังจะช่วยให้จำหน่ายดอกเห็ดได้ราคาสูงขึ้นอีกด้วย

ซึ่งได้ทำการทดลองเพาะเห็ดเปรียบเทียบกันในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2563 โดยใช้เวลาในการทดลองประมาณ 1 เดือน และทำการเก็บดอกเห็ดวันละ 3 ครั้ง คือ ช่วงเช้า ช่วงก่อนเที่ยง และช่วงเย็น ผลที่ได้พบว่า ปริมาณเห็ดที่ได้จากโรงเรือนเพาะเห็ดที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินพร้อมระบบพ่นหมอกอัตโนมัติจะมีปริมาณมากกว่าโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 21 แต่

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินมาใช้ในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าร่วมกับระบบพ่นหมอกและระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ผลจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิใต้ดินในเขตจังหวัดอุดรธานีมีศักยภาพในการใช้

ระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดิน โดยมีอุณหภูมิใต้ดินเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 27-30 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความลึกที่เหมาะสมในการวางระบบทำความเย็นแบบท่อใต้ดินอยู่ที่ 1.5-2 เมตร เมื่อทดลองติดตั้งระบบทำความเย็นใต้ดินที่ความลึกดังกล่าว และแปรความเร็วลมที่ระดับต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วลมภายในท่อซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวล ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวภายในท่อและอากาศสูงขึ้นด้วย และสามารถช่วยลดอุณหภูมิอากาศออกท่อให้ต่ำกว่าอากาศภายนอกได้ประมาณ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงกลางวันที่อากาศร้อนจัด นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วลมในท่อมัลเล็กน้อยในการช่วยอุ่นอากาศในช่วงที่อุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอุณหภูมิใต้ดิน และเมื่อนำระบบไปใช้ร่วมกับโรงเรือนเพาะเห็ดพบว่าที่ความเร็วลม 5.4 เมตรต่อวินาที จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำกว่าอากาศภายนอกได้ประมาณ 4 องศาเซลเซียส และสูงกว่าอุณหภูมิใต้ดินเพียง 0.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ความเร็วลมดังกล่าวจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศในโรงเรือนสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มการติดตั้งระบบพ่นหมอกพร้อมระบบควบคุมอัตโนมัติจะสามารถช่วยรักษาความชื้นสัมพัทธ์อากาศในโรงเรือนได้สูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดลองนำเห็ดนางฟ้ามาเพาะจริงเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าปริมาณดอกเห็ดที่ได้จะมากกว่าเห็ดที่ได้จากโรงเรือนเพาะเห็ดแบบดั้งเดิมถึง 23 เปอร์เซ็นต์ และลดเหลือ 12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาต้นทุนในการสร้างโรงเรือนเพาะเห็ดร่วมกับเทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินที่เพิ่มขึ้นจากโรงเรือนดั้งเดิม และระบบที่พัฒนาขึ้นมาแล้วยังมีศักยภาพในการช่วยเกษตรกรในการเพาะเห็ดนอกฤดูกาลได้อีกด้วย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ผ่านการประกวดโครงร่างวิจัยพลังงาน (Young Energy research Showcase, YES) และได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และสถานที่ในการศึกษาวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี

## เอกสารอ้างอิง

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Country fact sheet on food and agriculture policy trends: socio-economic*

*context and role of agriculture (Thailand)*. [Online]. Available: <http://www.fao.org/in-action/fapda/publications/country-fact-sheets/en/>

[2] Department of Agricultural Extension. (2017). *List of community enterprises*. [Online]. Available: <https://smce.doae.go.th/ProductCategory/SmceCategory.php>

[3] Kung Krabaen Bay Royal Development Study Centre. (2020). *Economic Mushroom Production*. [Online]. Available: <https://www4.fisheries.go.th/>

[4] Q. A. Mandeel, A. A. Al-Laith, and S. A. Mohamed, "Cultivation of oyster mushrooms (*Pleurotus* spp.) on various lignocellulosic wastes," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 21, pp. 601-607, 2005.

[5] P. Patel and R. Trivedi, "Importance and effect of substrate for the cultivation of *pleurotus sajor-caju*," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, no. 1, pp. 1324-1326, 2015.

[6] G.M. Philip and C. Shu-Ting, *Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, and Environmental Impact*, 2nd ed., CRC Press, 2004.

[7] C. P. Pokhrel, N. Kalyan, U. Budathoki, and R. K. Yadav, "Cultivation of *Pleurotus sajor-caju* using different agricultural residues," *International Journal of Agricultural Policy and Research*, vol. 1, no. 2, pp. 019-023, 2013.

[8] S. A. Shinde, A. B. Pandey, and S. S. Patil, "Temperature and light intensity influences on growth of *Pleurotus sajor-caju*," *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, vol. 6, pp. 261-265, 2016.

[9] M. Rout, K. Mohapatra, and P. Mohanty, "Studies on effect of incubation temperature and light intensity on mycelial growth of oyster species,"

- Journal Crop and Weed*, vol. 11, pp. 44–46, 2015.
- [10] S. Thepa, K. Kirtikara, J. Hirunlabh, and J. Khedari, “Improving indoor conditions of a Thai-style mushroom house by means of an evaporative cooler and continuous ventilation,” *Renewable Energy*, vol. 17, no. 3, pp. 359–369, 1999.
- [11] I. M. A. Aljubury and H. D. a. Ridha, “Enhancement of evaporative cooling system in a greenhouse using geothermal energy,” *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 321–331, 2017.
- [12] M. Ghoullem, K. El Moueddeb, E. Nehdi, R. Boukhanouf, and J. Kaiser Calautit, “Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status,” *Biosystems Engineering*, vol. 183, pp. 121–150, 2019.
- [13] N. Nkolisa, L. S. Magwaza, T. S. Workneh, and A. Chiphango, “Evaluating evaporative cooling system as an energy- free and cost- effective method for postharvest storage of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) for smallholder farmers,” *Scientia Horticulturae*, vol. 241, pp. 131–143, 2018.
- [14] Y. Uchida, K. Yasukawa, N. Tenma, Y. Taguchi, T. Ishii, and J. Suwanlert, “Subsurface temperature survey in Thailand for geothermal heat pump application,” *Journal of the Geothermal Society of Japan*, vol. 33, pp. 93–98, 2011.
- [15] S. Mongkon and S. Polvongsri, “Enhancement of the cooling performance of earth tube system by increasing soil moisture for use in agricultural greenhouse,” *RMUTI Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 151–164, 2016 (in Thai).
- [16] S. Bantoengpaiboon, “Energy saving air conditioning system design with a ground heat exchanger,” M.S. thesis, School of Construction and Infrastructure Management, Suranaree University of Technology, 2018 (in Thai).
- [17] T. Sri-on and A. Koonsrisuk, “Cooling performance of a hybrid ground-source heat pump with different cooling-water loop configurations,” in *Proceedings The 34<sup>th</sup> National Graduate Research Conference*, 2015, pp. 188–197 (in Thai).
- [18] M. C. Lekhal, R. Belarbi, A. M. Mokhtari, M.-H. Benzaama, and R. Bennacer, “Thermal performance of a residential house equipped with a combined system: A direct solar floor and an earth–air heat exchanger,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 40, pp. 534–545, 2018.
- [19] Land Development Department. (2016). *Provincial soil resource information*. [Online]. Available: [http://www.ldd.go.th/www/lek\\_web/](http://www.ldd.go.th/www/lek_web/)
- [20] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw Hill Education, 2015.
- [21] A. A. Serageldin, A. K. Abdelrahman, and S. Ookawara, “Earth-air heat exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation,” *Energy Conversion and Management*, vol. 122, pp. 25–38, 2016.
- [22] P. Patel and R. Trivedi, “Effect of substrate and spawn rate on the growth parameter, yield and biological efficiency of *pleurotus sajor-caju*,” *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, vol. 1, no. 6, pp. 82–92, 2014.