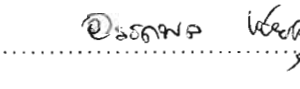
# การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานซึ่งสร้างขึ้นด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

นานทรี หุ้นเหี้ยง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ นานทรี หุ้นเหี้ยง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

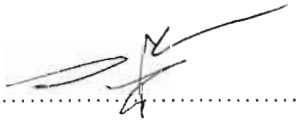
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

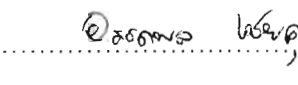
(ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



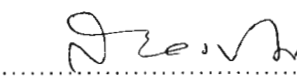
..... ประธาน

(ดร.วทัญญู รอดประพัฒน์)



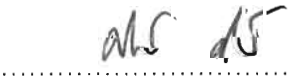
..... กรรมการ

(ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ)



..... กรรมการ

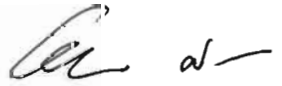
(รองศาสตราจารย์สำเภา จงจิตต์)



..... กรรมการ

(ดร.ศรัณย์ ภิบาลชนม์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 8 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

การศึกษาวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาระดับปริญญาโท จาก
โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.)
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ
ประจำปีการศึกษา 2556 – 2557

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.อรรถพล เชยศุภเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์วิโรจน์ เครือภู่ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ตรวจแก้ไขและวิจารณ์ผลงาน ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือและวิธีการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อมี – คุณแม่นงเยาว์ สุขแสน และ คุณพ่อเจิ้น – คุณแม่นารี หุ้นเหี้ยง และขอขอบคุณ นายทรงกลด หุ้นเหี้ยง (สามี) รวมไปถึงเพื่อนร่วมงานจากโรงเรียนรัษฎา จังหวัดตรัง และเพื่อนร่วมรุ่นในโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) ฟิสิกส์ศึกษา มหาวิทยาลัยบูรพา ทุกท่านที่ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

นานทรี หุ้นเหี้ยง

56920165: สาขาวิชา: ฟิสิกส์ศึกษา; วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)
คำสำคัญ: หม้อดินเก็บความเย็น / วงบ่อซีเมนต์/ ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน/
ปัจจัยทางกายภาพ/ ความชื้นสัมพัทธ์/ อุณหภูมิ

นานทรี หุ้นเหี้ยง: การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานซึ่งสร้างขึ้นด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น (THE STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES FOR RELATIVE HUMIDITY AND TEMPERATURE IN THE BHUTAN OYSTER MUSHROOM CULTIVATING CEMENT ROUNDS BASED ON THE POT-IN-POT REFRIGERATOR MODEL)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อรรถพล เชยศุภเกตุ, ปร.ด. 100 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาดังกล่าว โดยเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีของแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน จากนั้นจึงทดลองเพาะเลี้ยงเห็ดในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาเทียบกับห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ โดยใช้ถุงเชื้อเห็ดห้องละ 34 ถุง บันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ตลอดจนเก็บเห็ดที่ออกดอกและเจริญเติบโตเต็มที่มาชั่งมวล ในช่วงเวลา 60 วัน แล้วนำมาวิเคราะห์ อภิปรายและสรุปผล

ผลการวิจัย พบว่า 1) สามารถออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นและใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานได้ ซึ่งเมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนั้น พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่บันทึกได้ในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาดังกล่าว อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐานและสอดคล้องกับทฤษฎี 2) เมื่อทดลองเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ปรากฏว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาสอดคล้องกับทฤษฎี และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน ขณะที่ในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกตินั้นจะมีช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐานทุกวัน และอุณหภูมิก็มีความผันผวนมากกว่าในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา จึงมีผลทำให้เก็บผลผลิตเห็ดนางฟ้าภูฐานจากห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาได้ 5 รุ่น ได้มวลรวม 7,655 กรัม มวลเฉลี่ยต่อถุง 255.15 กรัม ขณะที่เก็บผลผลิตเห็ดนางฟ้าภูฐานจากห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติได้ 4 รุ่น ได้มวลรวม 5,583 กรัม มวลเฉลี่ยต่อถุง 164.21 กรัม

56920165: MAJOR: PHYSICS EDUCATION; M.Sc. (PHYSICS EDUCATION)
KEYWORDS: POT-IN-POT REFRIGERATOR/ CEMENT ROUNDS/
THE BHUTAN OYSTER MUSHROOM CULTIVATING/ PHYSICAL
PROPERTIES/ RELATIVE HUMIDITY/ TEMPERATURE

NANTAREE HUNHIANG: THE STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES FOR RELATIVE HUMIDITY AND TEMPERATURE IN THE BHUTAN OYSTER MUSHROOM CULTIVATING CEMENT ROUNDS BASED ON THE POT-IN-POT REFRIGERATOR MODEL. ADVISORY COMMITTEE: ATTAPOL CHOEYSUPPAKET, Ph.D. 100 P. 2016.

The purpose of this research was to design and build the Bhutan Oyster mushroom cultivating cement rounds based on the pot-in-pot refrigerator model, and study the physical properties affect on relative humidity and temperature of the air in that cultivating room, by compare calculated temperature in the cultivating room and suitable temperature for growing the Bhutan Oyster mushroom. Then we grow the Bhutan Oyster mushroom in two type cement rounds cultivating rooms, based on the pot-in-pot refrigerator model and normal model, using 34 infection Bhutan Oyster mushroom bags. So we collect data of relative humidity and temperature in both cultivating rooms, as well as harvest all mushroom to measure their mass, for 60 days, to analyze and conclude this research.

We consider 2 parts of the results. 1) Before the Bhutan Oyster mushroom cultivating, relative humidity and temperature in the cultivating cement rounds based on the pot-in-pot refrigerator model that we designed and built, is in the appropriate range for the mushroom growing. And that values accordance with the theory of pot-in-pot refrigerator model. 2) During the Bhutan Oyster mushroom cultivating, relative humidity in normal cultivating room is lower than the appropriate range for the mushroom growing, at noon every day. And there are more fluctuations than in model cultivating room. As the results, we harvest all mushroom from model cultivating room 5 times, total mass is 7,655 g, mass per bag is 255.15 g. Although, we harvest all mushroom from normal cultivating room 4 times, total mass is 5,583 g, mass per bag is 164.21 g.

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... จ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

1.3 ปัญหาและสมมติฐานของการวิจัย..... 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 4

1.5 ขอบเขตของการวิจัย..... 5

1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย..... 5

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ..... 6

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 7

2.1 หม้อดินเก็บความเย็น (Pot-in-pot Refrigerator)..... 7

2.2 การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer)..... 9

2.3 แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น..... 13

2.4 คอนกรีต (Concrete)..... 20

2.5 เห็ดนางฟ้าและเห็ดนางฟ้าภูฐาน..... 22

2.6 การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทย..... 25

2.7 การเพาะเห็ดในโอ่ง..... 29

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 32

# สารบัญ (ต่อ)


| บทที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3 | วิธีการดำเนินการวิจัย | 34 |
| | 3.1 กรอบแนวคิดของการวิจัย | 34 |
| | 3.2 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 34 |
| | 3.3 ขั้นตอนและแนวทางการทดลองในการวิจัย | 35 |
| | 3.4 สถานที่และระยะเวลาการดำเนินงาน | 39 |
| 4 | ผลการวิจัย | 41 |
| | 4.1 การออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 41 |
| | 4.2 การศึกษาปัจจัยกายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 42 |
| | 4.3 การทดลองเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 50 |
| | 4.4 การวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงและเปรียบเทียบมวลของเห็ดที่เก็บมาจากทั้งห้องเพาะเลี้ยงที่สร้างขึ้นทั้งสองแบบ | 55 |
| 5 | อภิปรายและสรุปผล | 58 |
| | 5.1 อภิปรายผล | 58 |
| | 5.2 สรุปผลการวิจัย | 61 |
| | 5.3 ข้อเสนอแนะ | 62 |
| บรรณานุกรม | | 63 |
| ภาคผนวก | | 66 |
| | ภาคผนวก ก | 67 |
| | ภาคผนวก ข | 81 |
| | ภาคผนวก ค | 87 |
| | ภาคผนวก ง | 91 |
| ประวัติย่อของผู้วิจัย | | 100 |

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1 | การกำหนดระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย..... | 40 |
| 2 | ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการศึกษาตามทฤษฎีหม้อดินเก็บความเย็น..... | 43 |
| 3 | ผลจากการคำนวณกรณีอ้างอิง: $T_\infty = 30\,^\circ$C, $\Phi_\infty = 60\,\%$, $Q_{load} = 10$ W..... | 43 |
| 4 | ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง T _cold_m, T_∞ และ Φ_∞..... | 53 |
| 5 | ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Φ_cold_m, T_∞ และ Φ_∞..... | 54 |
| 6 | ผลเนื่องจากการแปรค่า $\Phi_\infty$ และ $T_\infty$ ..... | 68 |
| 7 | ผลเนื่องจากการแปรค่า $Q_{load}$ ที่ค่า $T_\infty(ref) = 30\,^\circ$C..... | 68 |
| 8 | ผลเนื่องจากการแปรค่า $k_{eff}$ (W/m-K) ที่ค่า $T_\infty(ref) = 30\,^\circ$C สำหรับ $Q_{load} = 10$ W..... | 69 |
| 9 | ผลเนื่องจากการแปรค่า $k_{con}$ (W/m-K) ที่ค่า $T_\infty(ref) = 30\,^\circ$C สำหรับ $Q_{load} = 10$ W..... | 69 |
| 10 | การเปลี่ยนแปลงค่า $T_\infty$, $T_{cold}$ จากทฤษฎีและที่วัดได้ $\Phi_\infty$ และ $\Phi_{cold}$ ที่วัดได้เมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง..... | 70 |
| 11 | มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานจากถุงเชื้อเห็ด V1 – V34 ซึ่งเพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นในช่วงเวลา 60 วัน..... | 76 |
| 12 | มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานจากถุงเชื้อเห็ด H1 – H34 ซึ่งเพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติในช่วงเวลา 60 วัน..... | 79 |

# สารบัญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1 | การใช้งานหม้อดินเก็บความเย็น | 8 |
| 2 | หลักการทำงานของหม้อดินเก็บความเย็น | 8 |
| 3 | การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติ | 10 |
| 4 | แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 14 |
| 5 | แบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ | 15 |
| 6 | เห็ดนางฟ้าภูฐานที่เจริญเติบโตจากถุงเชื้อ | 23 |
| 7 | วงจรชีวิตของเห็ดนางฟ้า | 24 |
| 8 | โรงเรือนเพาะเห็ด | 26 |
| 9 | เห็ดที่เพาะในโรงเรือน | 26 |
| 10 | ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดทำจากตู้ไม้ | 27 |
| 11 | ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดที่ทำด้วยโอ่ง | 30 |
| 12 | แบบห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 41 |
| 13 | ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 42 |
| 14 | ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $\Phi_{\infty}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 45 |
| 15 | ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $\Phi_{\infty}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 45 |
| 16 | ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $Q_{load}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 46 |
| 17 | ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $Q_{load}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 46 |
| 18 | ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $k_{eff}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 48 |
| 19 | ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $k_{eff}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น | 48 |

# สารบัญภาพ (ต่อ)


ภาพที่ หน้า

20 ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $k_{con}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น..... 49

21 ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $k_{con}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น..... 50

22 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากสิ่งแวดล้อม และภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาทั้งที่วัดได้และจากการคำนวณโดยทฤษฎี เมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง..... 52

23 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากสิ่งแวดล้อมและภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา เมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง..... 53

24 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 1 – 15 ของการทดลอง..... 55

25 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 16 – 30 ของการทดลอง..... 56

26 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 31 – 45 ของการทดลอง..... 56

27 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 46 – 60 ของการทดลอง..... 57

28 ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นที่สร้างขึ้น 82

29 การเขียนป้ายชื่อบนถุงเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐาน..... 82

30 การจัดเรียงถุงเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงและการติดตั้งดาต้าล็อกเกอร์..... 83

31 การคลุมและปิดล้อมห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน..... 83

32 เห็ดนางฟ้าภูฐานเริ่มงอก..... 84

33 เห็ดนางฟ้าภูฐานกำลังเจริญเติบโตในห้องเพาะเลี้ยง..... 84

34 ตัวอย่างเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ..... 85

ตัวอย่างเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา..... 86

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อดินเก็บความเย็น (Pot-in-Pot Refrigerator) เป็นเครื่องใช้ในการเก็บรักษาอาหาร จำพวกพืชผัก ผลไม้ ให้คงความสดไว้ได้นานกว่าปกติ ซึ่งเป็นที่นิยมในแถบประเทศที่ยังขาดแคลนเทคโนโลยีไฟฟ้า มีอากาศร้อน แห้งแล้ง เช่น ชนบทในอินเดีย ไนจีเรีย ซูดาน เป็นต้น หม้อดินเก็บความเย็นนี้มีลักษณะเป็นหม้อดินขนาดเล็ก ซ้อนอยู่ในหม้อดินขนาดใหญ่ และระหว่างหม้อทั้งสองขนาดดังกล่าวจะมีโคลนหรือทรายเปียก แล้วเก็บพืชผักไว้ภายในหม้อ โดยวางหม้อดินเก็บความเย็นนี้ในแนวตั้ง ปิดฝาด้วยวัสดุเปียกชื้น เช่น ผ้า หรือ กระสอบป่าน จะสามารถยืดอายุของพืชผักได้ เช่น สามารถเก็บมะเขือเทศและกระเจี๊ยบให้คงความสดได้นาน 3 และ 2 สัปดาห์ตามลำดับ เป็นต้น (Clay Based Technologies, 2007, pp. 11-12) อีกทั้ง Date (2012) ได้ทำการศึกษากระบวนการเก็บความเย็นของหม้อดินเนื่องมาจากการระเหยของน้ำในชั้นทรายเปียก ซึ่งอยู่ในบริเวณพื้นที่ระหว่างหม้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40 และ 50 cm ที่ซ้อนกันเชิงรัศมี โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันของค่าประสิทธิภาพอุณหพลวัตและอุณหภูมิในหม้อชั้นใน ซึ่งมาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการถ่ายโอนความร้อนและมวลผ่านผนังหม้อ อ้างอิงกับแบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ (Reynolds' Flow Model) และได้ข้อมูลว่า อัตราการระเหยของน้ำดังกล่าว มีความเกี่ยวข้องกับ 1) สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของผนังดินเหนียวและทรายเปียก 2) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Coefficient) ภายนอก 3) สภาพการนำไฮดรอลิก (Hydraulic Conductivity) ของผนังดินเหนียว 4) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (mass transfer coefficient) และ 5) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของหม้อดิน ทั้งนี้ ในการแปรค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้ววิเคราะห์ผล พบว่าในช่วงที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมอยู่ระหว่าง 35 – 45 °C และ 30 – 50 % ตามลำดับ อุณหภูมิภายในหม้อที่เก็บไว้ได้จะแปรผันอยู่ในช่วง 23.06 - 37.33 °C

วงบ่อซีเมนต์ หรือวงบ่อเกรอะ (Cement Rounds) เป็นวัสดุก่อสร้างที่หล่อขึ้นจากปูนพอร์ตแลน ผสมกับทราย หินลูกรัง และน้ำ มีโครงเป็นลวด ใช้ประโยชน์ในการทำบ่อเกรอะสำหรับระบบบำบัดแบบดั้งเดิม ส้วมซึม เทก้นหลุมฟุตติ้ง ยกพื้นคอนกรีต ใช้ปลูกต้นไม้ หรือใช้ในการเกษตร เช่น สวนมะนาว เพาะเลี้ยงเห็ด เป็นต้น มีความแข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา ทำให้สะดวกในการขนย้าย (อภินันท์ สุวรรณรักษ์, 2555)

เห็ดจัดเป็นวัตถุดิบจำพวกผักอย่างหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้ประกอบอาหาร เนื่องจากมีรสชาติดี มีคุณค่าทางอาหารสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีโปรตีนและวิตามินสูง ไขมันต่ำ มีเส้นใยสูง บริโภคได้ทุกเพศ ทุกวัย จนมีผู้ยกย่องให้เป็นราชาแห่งผัก (King of the Vegetables) อีกทั้งมีความเชื่อเกี่ยวกับสรรพคุณทางยา เช่น การป้องกันการสะสมไขมันในเส้นเลือด โรคทางเดินหายใจ โรคความดันโลหิตสูง ป้องกันและรักษาโรคมะเร็ง ฯลฯ (ประสาน ยิ้มย่อง, 2549)

เห็ดนางฟ้าภูฐาน (Bhutan Oyster Mushroom) เป็นเห็ดตระกูลเดียวกับเห็ดนางฟ้าเดิมทีพบที่ประเทศภูฐาน เกิดขึ้นบนต้นไม้เนื้ออ่อนที่ตายแล้ว บริเวณที่อากาศชื้นและเย็น เจริญเติบโตได้เร็วมาก ดอกเห็ดมีสีขาวจนถึงสีน้ำตาลอ่อน หมวกดอกเนื้อแน่นสีคล้ำ ก้านดอกสีขาว ขนาดยาว ไม่มีวงแหวนล้อมรอบ ครีบดอกสีขาวอยู่ชิดติดกันมากกว่าครีบดอกเห็ดเป๋าฮื้อ เส้นใยค่อนข้างละเอียด และสิ่งที่เด่นกว่าเห็ดชนิดอื่นคือการออกดอกเห็ดเร็ว ระยะช่วงห่างของการออกดอกสั้น มีความสามารถในการใช้อาหารสูง ถ้าใส่อาหารมากผลผลิตก็มาก มีความต้านทานราสีเขียวและราสีดำสูง สามารถเพาะได้ตลอดปี เห็ดนางฟ้าภูฐานจึงเป็นผลิตผลทางเกษตรกรรมที่มีความสำคัญ เป็นที่นิยมในการผลิต จำหน่าย และบริโภค อีกทั้งอุดมไปด้วยคุณประโยชน์ในด้านโภชนาการ (ปรีชา รัตนัง, 2555)

การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทยเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งทำเป็นอาชีพหลัก หรือทำเป็นงานอดิเรก และเพาะเลี้ยงสำหรับบริโภคในครัวเรือน โดยจะนำถุงเพาะเชื้อเห็ดที่พร้อมสำหรับการเปิดดอกไปจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบในสถานที่สำหรับเพาะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเห็ด ซึ่งจะต้องการระบายอากาศให้หมุนเวียนแก๊สออกซิเจนได้ดี จะช่วยให้การเจริญเติบโตของเส้นใยและการพัฒนาไปเป็นดอกเห็ดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป เส้นใยอาจเกิดการหยุดชะงักการเติบโต ทำให้ดอกเห็ดฝ่อหรือเน่าได้ อีกทั้งสามารถควบคุมปริมาณแสงสว่างที่เหมาะสมได้ มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 70-80 % และมีอุณหภูมิประมาณ 25 – 35 °C แสงสว่างจากดวงอาทิตย์จะส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิและความชื้น แต่เห็ดก็ต้องการแสงเพื่อใช้เป็นตัวกระตุ้นให้เส้นใยเกิดการรวมตัวและพัฒนาไปเป็นดอกเห็ด หากได้รับแสงที่เพียงพอจะช่วยให้เห็ดออกดอกดกและสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม หากมีลมพัดมากเกินไปจะส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น อีกทั้งยังเสี่ยงต่อการนำพาเชื้อโรคอีกด้วย ถ้าเพาะเลี้ยงเป็นอาชีพจะใช้โรงเรือน หรือถ้าหากเพาะเลี้ยงเพื่อรับประทานในครัวเรือนจะนิยมสร้างตู้ไม้ หรืออาจใช้โอ่งดิน หรือวงบ่อซีเมนต์ ซึ่งจะจัดให้โอ่งดินหรือวงบ่อซีเมนต์อยู่ในแนวนอน ทั้งนี้ สถานที่เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานจะต้องเอื้อต่อการรดน้ำเพื่อให้ความชื้นแก่เห็ด การเพิ่มความชื้นในอากาศบริเวณ

ที่เพาะเห็ดควรใช้น้ำสะอาดที่มีสภาพเป็นกลาง มีการระบายอากาศได้เพื่อลดอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ เห็ด และปกคลุมด้วยวัสดุที่ทึบแสงสามารถปรับระดับความสว่างได้ ดังนั้น ผู้เพาะเลี้ยงเห็ดจึงต้องหมั่นติดตามในการควบคุมปริมาณความชื้นและอุณหภูมิภายในสถานที่เพาะเลี้ยงอยู่เสมอ (ปรีชา รัตนัง, 2555)

ดังที่กล่าวมานั้น ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงความสำคัญและสภาพที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในโอ่งและวงบ่อซีเมนต์ในประเทศไทย และผลการศึกษาแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นที่ใช้ในประเทศอินเดีย ไนจีเรีย และซูดาน ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานที่ปรับรูปแบบมาจากแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นโดยเปลี่ยนมาใช้วัสดุเป็นวงบ่อซีเมนต์แทนดิน เพื่อให้สามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเพาะเลี้ยงมีค่าอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับสภาพที่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน โดยให้มีการรดน้ำลงในชั้นทรายเปียกของห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาเพื่อให้ความชื้นแก่เห็ดเพียงวันละ 1 ครั้ง ต่างไปจากที่เกษตรกรเพาะเลี้ยงในวงบ่อซีเมนต์กันโดยปกติซึ่งจะมีการรดน้ำลงบนถุงเชื้อเห็ดโดยตรง วันละ 3-4 ครั้ง แล้วจึงจะได้ศึกษาเปรียบเทียบมวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เจริญเติบโตภายในห้องเพาะเลี้ยงสองแบบ คือ สร้างตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นกับแบบวงบ่อซีเมนต์ตามที่เกษตรกรนิยมทำกันทั่วไป ซึ่งผู้วิจัยมุ่งหวังว่าหากสามารถใช้ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าที่สร้างขึ้นแล้วได้เห็ดที่มีมวลเท่าหรือมากกว่าการเพาะเลี้ยงภายในวงบ่อซีเมนต์ตามที่เกษตรกรนิยมทำกันทั่วไป จะเป็นการช่วยลดภาระในการควบคุมอุณหภูมิอากาศและการรดน้ำให้ความชื้นแก่เห็ด ซึ่งจะได้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและนำไปประยุกต์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

2. ศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานที่สร้างขึ้น โดยเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีของแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน

## 1.3 ปัญหาและสมมติฐานของการวิจัย

ตอนที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา

ปัญหา: ห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา จะสามารถควบคุมอากาศภายในห้องให้มีอุณหภูมิสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีของแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ดนางฟ้าภูฐานหรือไม่

สมมติฐาน: ห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา ซึ่งเนื้อซีเมนต์มีความพรุนใกล้เคียงกับดิน จะทำให้น้ำในชั้นทรายเปียกระเหยผ่านผนังซีเมนต์และพาความร้อนออกไปได้ จึงสามารถควบคุมอากาศภายในห้องให้มีอุณหภูมิสอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีของแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ดนางฟ้าภูฐาน

ตอนที่ 2 การเปรียบเทียบมวลของเห็ดนางฟ้าภูฐาน ระหว่างเห็ดที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา กับเห็ดที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ

ปัญหา: เห็ดนางฟ้าภูฐานที่เจริญเติบโตในห้องเลี้ยงที่ศึกษา จะมีมวลมากกว่าเห็ดนางฟ้าที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติหรือไม่

สมมติฐาน: เมื่อเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา ซึ่งสามารถควบคุมให้ภายในห้องเพาะเลี้ยงมีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดอกเห็ดนางฟ้าภูฐานแล้ว จะได้เห็ดนางฟ้าภูฐานที่มีมวลมากกว่าการเพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้รูปแบบห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานที่ทำด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น สามารถสร้างตามแบบ และใช้ในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานได้
2. ทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา
3. เห็ดนางฟ้าภูฐานที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา จะมีมวลมากกว่าเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ
4. การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา จะมีความสะดวกเกี่ยวกับภาระการรดน้ำ เพราะสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องเพาะเลี้ยงให้เหมาะแก่

การเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐานได้โดยที่ไม่ต้องรดน้ำลงบนเห็ดโดยตรง เป็นการลดความเสี่ยงที่น้ำจะเข้าไปในถุงเชื้อเห็ดซึ่งจะทำให้เชื้อเน่าเสีย

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นเป็นการประมวลทฤษฎีมาจากแบบจำลองการไหลเรย์โนลด์ (A.W. Date, 2012)

2. มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐาน พิจารณาในช่วงเวลาการเพาะเลี้ยงตั้งแต่เริ่มเปิดดอกไปจนเก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งหมด 60 วัน ซึ่งผู้วิจัยกำหนดขึ้นโดยคาดจากข้อมูลที่ศึกษามาว่าถุงเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานแต่ละถุงจะใช้เวลาในการเพาะนาน 2-4 เดือน โดยจะออกดอกประมาณ 5-7 รุ่น แต่ละรุ่นเว้นระยะห่างกันประมาณ 7-10 วัน ทั้งนี้ ขึ้นกับอาหารเพาะเชื้อ และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

3. สถานที่ในการศึกษา คือ บริเวณบ้านของผู้วิจัย ซึ่งอยู่ ณ บ้านเลขที่ 236/50 ถนนกันตัง ตำบลทับเที่ยง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง ซึ่งเป็นบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย

4. ช่วงเวลาที่ศึกษา เมษายน 2558 – มีนาคม 2559

## 1.6 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. ในการศึกษางานวิจัยนี้ จะต้องทดลองและวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในวงบ่อซีเมนต์ที่ศึกษาทั้งสองแบบซึ่งตั้งในสถานที่เปิด ไม่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมให้คงที่ได้ตลอดเวลา เช่น กระแสลม เป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะมีส่วนที่ทำให้ผลการวิจัยไม่สมบูรณ์

2. สถานที่ในการศึกษาตั้งอยู่ในจังหวัดตรัง และช่วงเวลาที่ทดลองเพาะเลี้ยงเห็ดนั้นมีความชื้นในอากาศสูง มีฝนตกบ่อย และอุณหภูมิอากาศไม่สูงมากนัก ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมดังทฤษฎีของแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นที่ผู้วิจัยศึกษามา ผู้วิจัยจึงคาดว่าจะมีส่วนที่ทำให้การวิเคราะห์ผลการศึกษาไม่สมบูรณ์

3. ในการเปรียบเทียบมวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่มาจากห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของรูปทรงของวงบ่อซีเมนต์ ทำให้ผู้วิจัยต้องวางถุงเชื้อเห็ดแนวตั้งในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา และวางถุงเชื้อเห็ดแนวนอนในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ ทั้งนี้ จากการสอบถามผู้มีประสบการณ์ในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้า ได้ทราบว่าเกษตรกรไม่นิยมวางถุงเชื้อเห็ดแนวตั้งเพราะยุ่งยากในการรดน้ำซึ่งต้องระมัดระวังไม่ให้น้ำเข้าไปในถุงเชื้อเห็ด และใช้พื้นที่

มากกว่าการวางถุงเชื้อเห็ดในแนวนอนซึ่งสามารถวางซ้อนกันได้มากถึง 10 ถุง ส่วนผลผลิตนั้นไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยคาดว่าการวางถุงเห็ดต่างกันนี้อาจมีผลทำให้ผลการวิจัยไม่สมบูรณ์อยู่บ้าง

## 1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ปัจจัยทางกายภาพที่จะศึกษา คือสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสิ่งแวดล้อมและวัสดุที่ใช้ทำห้องเพาะเลี้ยงเห็ด ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ สภาพการนำความร้อนของคอนกรีต สภาพการนำความร้อนของทรายเปียก สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวด้านนอกของวงบ่อซีเมนต์ชั้นนอก และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวงบ่อซีเมนต์ชั้นนอกชั้นในและวงบ่อซีเมนต์ชั้นนอก

2. ห้องเพาะเลี้ยง หมายถึง ระบบที่ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเพื่อศึกษา โดยจะสร้างสองแบบเพื่อเปรียบเทียบกัน คือ 1) ห้องเพาะเลี้ยงที่เป็นวงบ่อซีเมนต์วงเดียว วางให้หน้าตัดของวงบ่ออยู่ในแนวตั้ง ซึ่งจะเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามวิธีทั่วไปที่เกษตรกรใช้ และในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า “ห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ” และ 2) ห้องเพาะเลี้ยงที่ทำตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ซึ่งจะวางให้หน้าตัดของวงบ่ออยู่ในแนวราบ และในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า “ห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา”

3. วงบ่อซีเมนต์ (Cement Rounds) หมายถึง วัสดุคอนกรีตที่หล่อขึ้นจากปูนพอร์ตแลนผสมกับทราย หินลูกรัง และน้ำ มีโครงเป็นลวดเหล็ก ซึ่งปกติจะใช้ประโยชน์ในการทำบ่อเกรอะสำหรับระบบบำบัดแบบดั้งเดิม ส้วมซึม เทก้นหลุมฟุตติ้ง ยกพื้นคอนกรีต ใช้ปลูกต้นไม้ หรือใช้ในการเกษตร เช่น สวนมะนาว เพาะเลี้ยงเห็ด เป็นต้น และผู้วิจัยได้ใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน

4. มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐาน หมายถึง มวลของส่วนที่เป็นดอกเห็ดที่เจริญเติบโตเต็มที่ซึ่งสามารถเก็บออกจากถุงเพาะและนำไปใช้บริโภคได้

# บทที่ 2
# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อมวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เพาะเลี้ยงในวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

2.1 หม้อดินเก็บความเย็น (Pot-in-pot Refrigerator)

2.2 การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer)

2.3 แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

2.4 คอนกรีต (Concrete)

2.5 เห็ดนางฟ้าและเห็ดนางฟ้าภูฐาน

2.6 การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทย

2.7 การเพาะเห็ดในโอ่ง

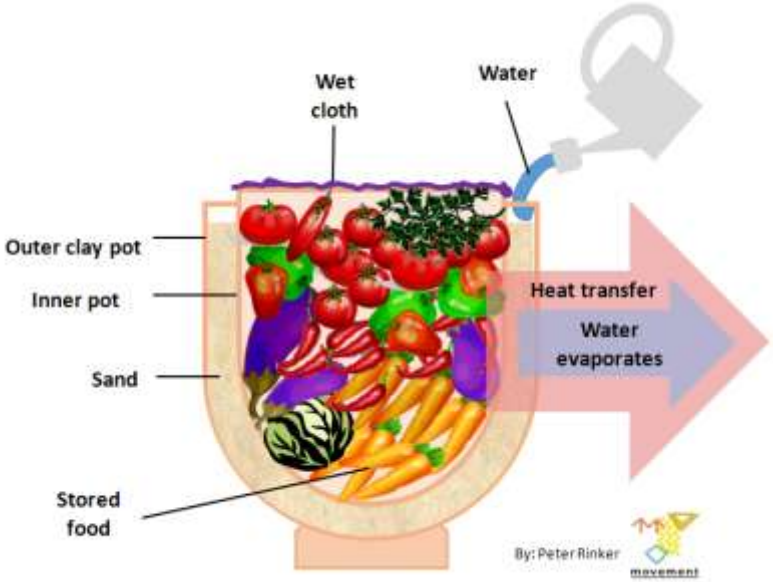
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 หม้อดินเก็บความเย็น (Pot-in-pot Refrigerator)

หม้อดินเก็บความเย็น (Pot-in-Pot Refrigerator) เป็นเครื่องใช้ในการเก็บรักษาอาหาร จำพวกพืชผัก ผลไม้ ให้คงความสดไว้ได้นานกว่าปกติ ซึ่งเป็นที่นิยมในแถบประเทศที่ยังขาดแคลนเทคโนโลยีและเครื่องใช้ไฟฟ้า มีอากาศร้อน แห้งแล้ง เช่น ประเทศยากจนในแอฟริกา ตะวันออกกลาง ชนบทในอินเดีย ซูดาน ไนจีเรีย เป็นต้น หม้อดินเก็บความเย็นนี้มีลักษณะเป็นหม้อดินขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40 cm) ซ้อนอยู่ในหม้อดินขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 cm) และระหว่างหม้อจะมีโคลนหรือทรายเปียก แล้วเก็บพืชผักไว้ในหม้อ โดยวางหม้อดินเก็บความเย็นนี้ในแนวตั้ง ปิดฝาด้วยฉนวน จะช่วยยืดอายุของพืชผักได้ เช่น มะเขือเทศ จะเก็บได้นาน 3 สัปดาห์ และกระเจี๊ยบแขก จะเก็บได้นาน 2 สัปดาห์ เป็นต้น (Clay Based Technologies, 2007) อย่างไรก็ตาม มีบางพื้นที่ก็ใช้กระถางดินเผา หรือหม้อดินเผา

ภาพที่ 1 การใช้งานหม้อดินเก็บความเย็น (Patrick@BRINQ, 2005)

Tarantola (2012) ได้กล่าวในบทความเกี่ยวกับหม้อดินเก็บความเย็นว่าในพื้นที่ทะเลทรายนั้น บางครั้งเทคโนโลยีการทำความเย็นด้วยไฟฟ้าก็ไม่สามารถช่วยได้ จึงจำเป็นต้องพึ่งพาเครื่องใช้อย่างง่ายดังเช่น หม้อดินเก็บความเย็นเซียร์ (Zeer Pot-in-Pot Refrigerator) เพราะอาศัยเพียงแค่น้ำ ทราย และอากาศร้อนและแห้ง เท่านั้น




ภาพที่ 2 หลักการทำงานของหม้อดินเก็บความเย็น (Rinker, 2014)

หม้อดินเก็บความเย็นเซียร์ (Zeer Pot Fridge) ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1995 โดย Mohammed Bah Abba ซึ่งเป็นครูระดับมัธยมศึกษาในประเทศไนจีเรีย และเติบโตมาในครอบครัวช่างปั้นหม้อ ด้วยการออกแบบที่เรียบง่ายอย่างไม่น่าเชื่อ เขาใช้หม้อดินเผาสองขนาด

ซ้อนกัน กั้นที่ว่างระหว่างหม้อด้วยชั้นของทรายเปียก เมื่อน้ำระเหยผ่านพื้นผิวของหม้อในนอกก็จะดึงความร้อนจากภายในออกมา ผลปรากฏว่าสามารถเก็บอาหารสด 12 kg ไว้ได้นานถึง 3-4 สัปดาห์ โดยไม่ต้องใช้ไฟฟ้า ผลงาน Bah Abba ทำให้ได้รับรางวัล Rolex Award for Enterprise ปี ค.ศ.2000 เป็นมูลค่า 75,000$ และรางวัล World Shell Award for Sustainable Development ในปี ค.ศ.2001 ในปัจจุบัน Bah Abba สามารถผลิตหม้อดินเก็บความเย็นเซียร์และขายได้ประมาณ 30,000 ชิ้นต่อปี ในราคาชิ้นละ 1.30$

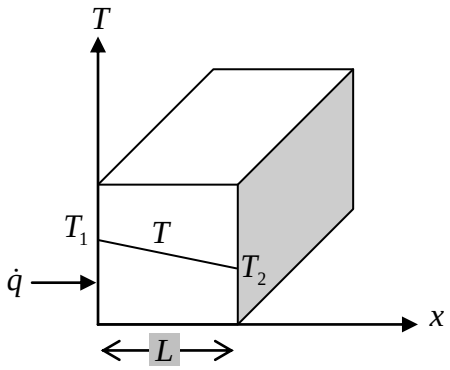
เมื่อมีการใช้งานหม้อดินเก็บความเย็นเซียร์ไปในวงกว้างในแถบประเทศทางแอฟริกาเหนือ นับว่าเกิดประโยชน์มาก โดยเฉพาะการซื้ออาหารสดมาประกอบอาหาร การขนส่งผลิตผลทางการเกษตร รวมไปถึงการเก็บรักษายารักษาโรคบางชนิดที่จำเป็นต้องเก็บในที่อุณหภูมิไม่สูงจนเกินไป และยังได้มีการนำเข้าสู่ห้องเรียนในประเทศไนจีเรีย จัดทำเป็นบทเรียนและแผนการจัดการเรียนรู้ในระดับมัธยมศึกษา เพื่อให้นักเรียนได้ศึกษาการถ่ายโอนความร้อน และการทำโครงงานวิทยาศาสตร์

## 2.2 การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายโอนความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) มี 3 ลักษณะ ได้แก่ การนำความร้อน (Heat Conduction) การพาความร้อน (Heat Convection) และการแผ่รังสี (Radiation)

2.2.1 การนำความร้อน (Heat Conduction) เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ ทั้งนี้วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสภาพการนำความร้อน ( Thermal Conductivity : $k$ ) ของตัวกลาง อัตราการถ่ายโอนความร้อนแบบนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) ซึ่งกล่าวว่า "สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายโอนความร้อน $(\dot{Q}_x)$ ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้น เป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อน $(A)$ ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว $(dT/dx)$" ดังนั้น สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะ คงตัว (Steady State) อุณหภูมิในตัวกลางเป็นฟังก์ชันของระยะ x จะเขียนสมการตามกฎของฟูเรียร์ได้เป็น

$$\dot{Q}_x = -kA\frac{dT}{dx} \tag{1}$$




ภาพที่ 3 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติ

สำหรับการนำความร้อนในตัวกลางยาว $L$ ที่มีสภาพการนำความร้อน $k$ คงตัว ภายใต้สภาวะคงตัวแล้ว ดังภาพที่ 3 จะได้ว่า

$$\dot{Q}_x = \frac{kA\Delta T}{L} \tag{2}$$

สำหรับผนังของวัตถุรูปทรงกระบอกยาว $L$ ที่มีรัศมีภายใน $r_i$ รัศมีภายนอก $r_o$ อุณหภูมิที่ผิวใน $T_i$ และอุณหภูมิที่ผิวนอก $T_o$ จะได้อัตราการนำความร้อนดังสมการ

$$\dot{Q}_r = \frac{2\pi Lk(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \tag{3}$$

2.2.2 การพาความร้อน (Heat Convection) เป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล เมื่อของไหลส่วนหนึ่งได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้ความหนาแน่นต่ำลงแล้ว ของไหลส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าก็จะเข้าแทนที่ ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัมซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient : $h$ ) ที่ผิวของแข็งนั้น จึงกล่าวได้ว่าความร้อนที่ถ่ายโอนนั้นเป็นผลมาจากการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลและการเคลื่อนไหวไปทั้งปริมาตรของของไหล ซึ่งการพาความร้อนนี้จำแนกออกเป็น

2 ประเภท คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural or Free Convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection)

ในการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่ $A_S$ อุณหภูมิผิว $T_S$ ขณะของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว $u_\infty$ และอุณหภูมิ $T_\infty$ คงตัว อัตราการพาความร้อนจะเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวลงของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ดังสมการ

$$\dot{Q}_{conv} = hA_S\left(T_S - T_\infty\right) \tag{4}$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหลและลักษณะเฉพาะของการไหล ซึ่งสมบัติของของไหลจะได้แก่ สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity: $k$ ) ความหนาแน่น (Density : $\rho$ ) ความหนืดสัมบูรณ์ (Dynamic Viscosity : $\mu$ ) ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat : $c_p$ ) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (Coefficient of Volume Expansion : $\beta$ )

Prandtl Number เป็นอัตราส่วนระหว่างสภาพแพร่ทางโมเมนตัมต่อสภาพแพร่ทางความร้อน ดังสมการ

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho c_p} = \frac{\mu c_p}{k} \tag{5}$$

แบบการไหลของของไหลซึ่งพิจารณาจากค่า Reynolds Number ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ตามสมการ

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho u \ell_c}{\mu} = \frac{u \ell_c}{\nu} \tag{6}$$

โดยที่ $u$ คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

$\ell_c$ คือ ความยาวสำคัญ (m)

$\nu$ คือ ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ของของไหล ($m^2/s$)

Grashof Number คืออัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงเนื่องจากความหนืด จะเขียนเป็น

$$Gr = \frac{g\beta\ell_c^3(T_S - T_\infty)}{\nu^2} \tag{7}$$

Nusselt Number คืออัตราส่วนของการพาความร้อนต่อการนำความร้อนในของไหล สำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จะเขียนเป็น

$$Nu = B(Gr \cdot \mathrm{Pr})^b \tag{8}$$

โดยที่ $B$ และ $b$ เป็นค่าคงตัว และกำหนด Rayleigh Number เป็น

$$Ra = Gr \cdot \mathrm{Pr} = \frac{g\beta\ell_c^3(T_S - T_\infty)}{\nu\alpha} \tag{9}$$

Schmidt Number คืออัตราส่วนระหว่างการแพร่ของโมเมนตัมกับการแพร่ของมวลของของไหล ดังสมการ

$$Sc = \frac{\nu}{\mu} \tag{10}$$

Lewis Number คืออัตราส่วนระหว่าง Schmidt Number กับ Prandtl Number ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity : $\alpha$) กับการแพร่โมเลกุล (mass diffusivity : $D$) ดังสมการ

$$Le = \frac{Sc}{\mathrm{Pr}} = \frac{\alpha}{D} \tag{11}$$

2.2.3 การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายโอนพลังงานจากผิวของตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกผิวของตัวกลางหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกันในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนโดยไม่

จำเป็นต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง อัตราการถ่ายโอนพลังงานด้วยการแผ่รังสีสูงสุดสำหรับวัตถุดำ (Black Body) จะเป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan–Boltzmann Law) ดังสมการ

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma A T_S^4 \tag{12}$$

โดยที่ $T_S$ คืออุณหภูมิที่ผิวแผ่รังสีในหน่วยองศาสัมบูรณ์ (K)

$\sigma$ คือค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 5.67x10$^{-8}$ W/m$^2$-K$^4$

สำหรับพื้นผิวจริง อัตราการแผ่รังสีจะขึ้นกับสภาพการเปล่งรังสี (Emissivity: $\varepsilon$ ) ของผิวนั้นด้วย จึงได้สมการเป็น

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A T_S^4 \tag{13}$$

สำหรับการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิว $A$ อุณหภูมิ $T_S$ มีสภาพเปล่งรังสี $\varepsilon$ กับสิ่งแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิคงตัว $T_{sur}$ จะได้สมการอัตราการแผ่รังสีเป็น

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A\left(T_S^4 - T_{sur}^4\right) \tag{14}$$

## 2.3 แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

ในการศึกษาทฤษฎีแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นนั้นมีค่าพารามิเตอร์เกี่ยวข้องจำนวนมาก จึงมีการกำหนดชื่อ สัญลักษณ์ และหน่วย ดังต่อไปนี้

| | |
|---|---|
| $A$ พื้นที่ผิว (m$^2$) | *Suffixes* |
| $B$ เลขสปัลดิง | $a$ อากาศ |
| $b$ ความหนาของผนังหม้อ/วงบ่อซีเมนต์ (m) | $con$ คอนกรีต |
| $Bi$ เลขบิโอต์ | $clay$ ดิน |
| $Cp$ ความร้อนจำเพาะ (J/kg-K) | $cold$ สิ่งแวดล้อมภายในหม้อใน |
| $COP$ สัมประสิทธิ์สมรรถนะ | $dp$ จุดน้ำค้าง |
| $g$ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (kg/m$^2$-s) | $e$ หลักการอนุรักษ์พลังงาน |

$H$ ความสูงของหม้อ/วงบ่อซีเมนต์ (m)

$h$ เอนทาลปีของสารผสม (J/kg)

$k$ สภาพนำความร้อน (W/m-K)

$\dot{m}$ อัตราการระเหยน้ำ (kg/s)

$Q$ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)

$T$ อุณหภูมิ (°C)

$r$ รัศมีทรงกระบอก (m)

*Greek symbols*

$\alpha$ สัมประสิทธิ์ถ่ายโอนความร้อน (W/m$^2$-K)

$\omega$ สัดส่วนมวล

$\eta_{th}$ ประสิทธิภาพอุณหพลวัต

$\Phi$ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

*eff* ทรายเปียก

*i* หม้อใน/วงบ่อซีเมนต์ใน

*in* ผลรวมของการแผ่รังสีและการพาความร้อน

*load* ภาระการทำความเย็น

*m* หลักการอนุรักษ์มวล หรือ ค่าเฉลี่ย

*M* สถานะสารที่ถูกถ่ายโอน

*nc* การพาความร้อนธรรมชาติ

*o* หม้อนอก/วงบ่อซีเมนต์นอก

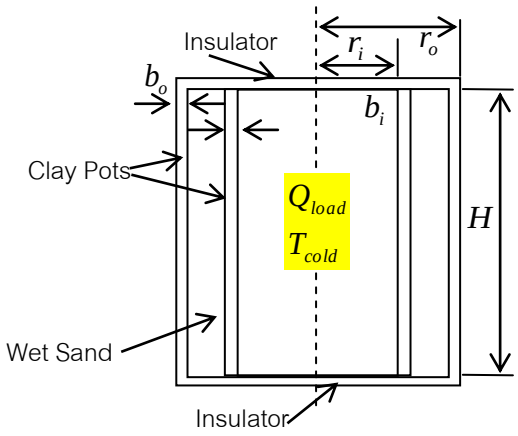
*rad* การแผ่รังสีความร้อน

*ref* ค่าอ้างอิง

*v* ไอน้ำ

*w* สถานะน้ำ (ของเหลว)

∞ สิ่งแวดล้อม



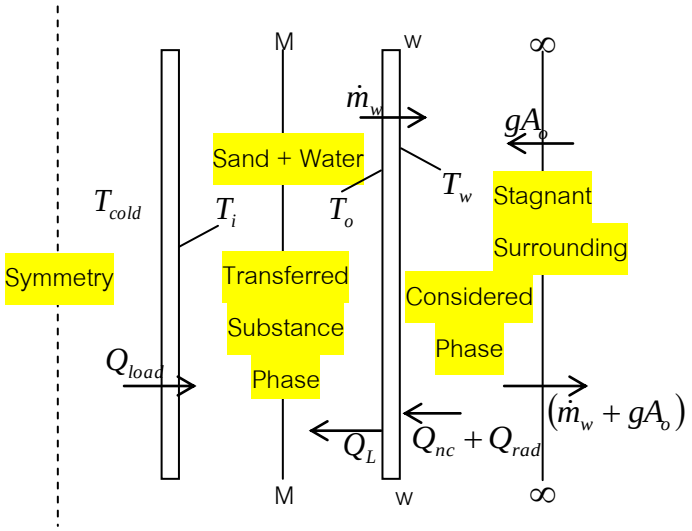

ภาพที่ 4 แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น (ดัดแปลงจาก Date, 2012)

ตามที่ Date (2012) ได้ศึกษาการเกี่ยวปัจจัยทางกายภาพที่ควบคุมการทำงานของหม้อดินเก็บความเย็น ได้อธิบายถึงค่าสมรรถนะ (Coefficient of Performance) ในการพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนของระบบทำความเย็น ซึ่งในการศึกษานี้ไม่สามารถควบคุม $Q_{in}$ ได้ จึงใช้ค่าประสิทธิภาพอุณหพลวัต (Thermodynamic efficiency) มาช่วยพิจารณา ดังสมการ

$$COP = \frac{Q_{load}}{Q_{in}} = \frac{q_{load} \times m_{food}}{Q_{in}} \quad (15)$$

$$\eta_{th} = \frac{T_{\infty} - T_{cold}}{T_{\infty} - T_{dp}} \quad (16)$$

เมื่อ $T_{\infty}$ คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และ $T_{dp}$ คืออุณหภูมิจุดน้ำค้างซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังในภาคผนวก (Wagner & Pruss, 1993 cited in Date, 2012)




ภาพที่ 5 แบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ (ดัดแปลงจาก Date, 2012)

และในการศึกษาความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันของ $\eta_{th}$ และ $T_{cold}$ จะต้องศึกษาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามกลุ่ม คือ สภาวะในสิ่งแวดล้อม $(T_{\infty}, \Phi_{\infty})$ ขนาดของหม้อดิน $(r_i, r_o, H, b_i, b_o)$ และสมบัติเชิงอุณหพลวัตของสาร $(k_{cl}, k_{eff}, \alpha_i, \alpha_o, \varepsilon)$ ดังสมการ

$$[\eta_{th}, T_{cold}] = F\{(T_{\infty}, \Phi_{\infty}), (r_i, r_o, H, b_i, b_o), (k_{cl}, k_{eff}, \alpha_i, \alpha_o, \varepsilon)\} \quad (17)$$

ในการศึกษานี้ มีสมมติฐานตามหลักการอนุรักษ์มวลและพลังงาน สอดคล้องกับแบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์และกฎของดาร์ซี ซึ่งจะต้องพิจารณาอัตราการระเหยของน้ำในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ

อัตราการระเหยของน้ำดังกล่าว $(\dot{m}_w)$ มีความเกี่ยวข้องกับ 1) สภาพการนำความร้อนของผนังดินเหนียว $(k_{cl})$ และทรายเปียกที่อยู่ในวงแหวน $(k_{eff})$ 2) ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนซึ่งขึ้นกับพื้นที่ผิวของหม้อชั้นนอก $(A_o)$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายนอก $(\alpha_o)$ 3) สภาพการนำไฮดรอลิกของผนังดินเหนียว $(K_H)$ 4) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และ 5) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของหม้อดิน $(\varepsilon)$

ดังที่กล่าวถึงหลักการอนุรักษ์มวลสำหรับ น้ำ-ไอน้ำ ระหว่างสภาวะ w-w และ ∞-∞ จะได้ว่า

$$gA_o\omega_{v,\infty} + \dot{m}_w = (\dot{m}_w + gA_o)\omega_{v,w} \tag{18}$$

เมื่อ $\omega_v$ คือสัดส่วนมวลไอน้ำ จึงได้ว่าสัดส่วนมวลของอากาศแห้งเป็น $\omega_a = 1-\omega_v$ จัดรูปได้เป็น

$$\dot{m}_{w,m} = gA_0 \times B \qquad \text{เมื่อ} \qquad B = \frac{\omega_{v,\infty} - \omega_{v,w}}{\omega_{v,w} - 1} \tag{19}$$

เรียก $B$ ว่า Spalding number เมื่อ $B = \dfrac{\omega_{v,\infty} - \omega_{v,w}}{\omega_{v,w} - 1}$

และเนื่องจากในระบบอากาศ-ไอน้ำ ที่เราพิจารณานั้นมีค่าเลขเลวิซ $Le \cong 1$ (สภาพการแพร่ของความร้อนเท่ากับสภาพการแพร่ของมวล) จึงสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล $g$ ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติ $\alpha_o$ ดังนี้

$$g \cong \frac{\alpha_o}{Cp_m} \tag{20}$$

ในสมการที่ 20 ตัวห้อย $m$ กำหนดว่า $\dot{m}_{w,m}$ คิดมาจากหลักการอนุรักษ์มวล ทั้งนี้ในการคำนวณหาค่า $Cp_m$ นั้น เราต้องทราบค่าของ $\omega_{v,\infty}$ จากการคำนวณดังความสัมพันธ์ที่กำหนดให้ในภาคผนวก (Wagner & Pruss, 1993 cited in Date, 2012) และทราบค่าของ $\omega_{v,w}$ จากการคำนวณดังความสัมพันธ์ที่กำหนดให้ในภาคผนวก (Crawford & Kays, 1993 cited in Date, 2012) เมื่อทราบ $T_w$

พิจารณาตามหลักการอนุรักษ์มวลของน้ำ-ไอน้ำ ที่อยู่ระหว่างหม้อชั้นนอกกับสิ่งแวดล้อม (สภาวะ w-w และ ∞-∞) ตามกฎของดาร์ซี จะได้สมการเป็น

$$\dot{m}_{w,m} = \left( \frac{\rho_w k_p A_o p_a}{\mu_w b_o} \right) \left( \frac{p_{H/2}}{p_a} - \frac{p_{w,sat}}{p_a} \right) \tag{21}$$

เมื่อ $p_{H/2} / p_a = 1 + 0.05H$ คิดตาม $p_a = 10$ m-$H_2O$

$p_{w,sat} / p_a = \omega_{v.w} / \left( 0.622 + 0.378\omega_{v,w} \right)$

$K_H = k_p p_a / \mu_w b_o$

จะได้ $$\dot{m}_{w,m} = \rho_w K_H A_o \left[ \left( 1 + 0.05H \right) - \frac{\omega_{v,w}}{0.622 + 0.378\omega_{v,w}} \right]$$

$$= \rho_w K_H A_o \left[ \frac{0.622\left( 1 + 0.05H \right) + \left( 0.0189H - 0.622 \right)\omega_{v,w}}{0.622 + 0.378\omega_{v,w}} \right] \tag{22}$$

เขียนให้อยู่ในรูปเดียวกับเรย์โนลด์เป็น

$$\dot{m}_{w,m} = g A_o \times B^*$$

จะได้ $$B^* = \frac{\rho_w K_H}{g} \left[ \frac{0.622\left( 1 + 0.05H \right) + \left( 0.0189H - 0.622 \right)\omega_{v,w}}{0.622 + 0.378\omega_{v,w}} \right]$$

$$= \frac{1}{Bi_m} \left[ \frac{0.622\left( 1 + 0.05H \right) + \left( 0.0189H - 0.622 \right)\omega_{v,w}}{0.622 + 0.378\omega_{v,w}} \right]$$

ดังนั้น $$B^* = \frac{\left( 0.622 - 0.0189H \right)\omega_{v,\infty} - 0.622\left( 1 + 0.05H \right)}{\left( 0.622 - 0.0189H \right)\left( \omega_{v,w} - 1 \right) - Bi_m \left( 0.622 + 0.378\omega_{v,w} \right)} \tag{23}$$

เมื่อพิจารณาว่า $Bi_m \equiv g / \left( \rho_w K_H \right)$ เป็นเลขบิโอต์การถ่ายโอนมวล

พิจารณาตามหลักการอนุรักษ์พลังงานของอากาศ-ไอน้ำ ที่อยู่ระหว่างหม้อชั้นนอกกับสิ่งแวดล้อม (ผิว w-w และ ∞-∞) จะได้สมการเป็น

$$gA_o h_\infty + \dot{m}_w h_{Mw} = Q_{rad} + Q_{nc} + (\dot{m}_w + gA_o)h_w \quad (24)$$

เมื่อ $h_{Mw} = Cp_w(T_w - T_{ref})$ เป็นเอนทัลปีของสารที่ถูกถ่ายโอน (น้ำ) ในสภาวะ w และ $Q_{rad}$ กับ $Q_{nc}$ คือความร้อนที่ถ่ายโอนเนื่องจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนธรรมชาติ ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกัน ตามหลักการอนุรักษ์พลังงานของอากาศ-ไอน้ำ ระหว่างผิว ∞-∞ และผิว M-M จะได้สมการเป็น

$$gA_o h_\infty + \dot{m}_w h_M + Q_{load} = Q_L + (\dot{m}_w + gA_o)h_w \quad (25)$$

เมื่อ $h_M = Cp_w(T_M - T_{ref})$ และ $Q_L$ คือการนำความร้อนในชั้นทรายเปียก

จากสมการ (20) $$gA_o(h_w - h_\infty) = \dot{m}_w(h_{Mw} - h_w) - Q_{rad} - Q_{nc}$$

จากสมการ (21)
$$\begin{aligned} Q_{load} - Q_L &= (\dot{m}_w + gA_o)h_w - gA_o h_\infty - \dot{m}_w h_M \\ &= \dot{m}_w(h_w - h_M) + gA_o(h_w - h_\infty) \\ &= \dot{m}_w(h_w - h_M) + \dot{m}_w(h_{Mw} - h_w) - Q_{rad} - Q_{nc} \end{aligned}$$

จึงได้ว่า $$Q_{load} - Q_L = \dot{m}_w(h_{Mw} - h_M) - Q_{rad} - Q_{nc} \quad (26)$$

$$= \dot{m}_w Cp_w\left(T_w - \frac{T_i - T_o}{2}\right) - Q_{rad} - Q_{nc} \quad (27)$$

เมื่อพิจารณาการนำความร้อนในระบบแกนของวัตถุรูปทรงกระบอก จะได้เป็น

$$\begin{aligned} Q_{load} - Q_L &= \left\{\frac{k_{eff} A_i}{r_i \ln(r_o/r_i)}\right\}(T_i - T_o) \\ T_i - T_o &= (Q_{load} - Q_L)\left\{\frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff} A_i}\right\} \end{aligned} \quad (28)$$

และเมื่อพิจารณาการนำความร้อนในระบบแกนของวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก จะได้เป็น

$$T_o - T_w = (Q_{load} - Q_L)\left\{\frac{b_o}{k_{cl} A_o}\right\} \tag{29}$$

ดังนั้น รวมสมการ (28) และ (29) จึงได้

$$T_i - T_w = \left[\frac{b_o}{k_{cl} A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff} A_i}\right](Q_{load} - Q_L) \tag{30}$$

และรวมสมการ (29) และ (30) จึงได้

$$T_w - \left(\frac{T_i + T_o}{2}\right) = -\left[\frac{2b_o}{k_{cl} A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff} A_i}\right](Q_{load} - Q_L) \tag{31}$$

แทนค่าในสมการที่ (27) จะได้

$$Q_{load} - Q_L = -(Q_{rad} + Q_{nc})\left[1 + \frac{\dot{m}_w Cp_w}{2}\left\{\frac{2b_o}{k_{cl} A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff} A_i}\right\}\right]^{-1} \tag{32}$$

ในทำนองเดียวกัน การถ่ายโอนความร้อนผ่านผิว S-S คือ

$$T_{cold} - T_i = \frac{Q_{load}}{A_i}\left[\frac{1}{\alpha_i} + \frac{b_i}{k_{cl}}\right] \tag{33}$$

รวมสมการ (30) และ (33) จึงได้

$$T_{cold} - T_w = \frac{Q_{Load}}{A_i}\left[\frac{1}{\alpha_i} + \frac{b_i}{k_{cl}}\right] + \left[\frac{b_o}{k_{cl} A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff} A_i}\right](Q_{Load} - Q_L) \tag{34}$$

แทนค่าสมการ (27) และ (30) ในสมการ (34) จะได้

$$T_{cold} - T_w = -\left[\frac{b_o}{k_{cl}A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff}A_i}\right] \times (Q_{rad} + Q_{nc}) \times \left[1 + \frac{\dot{m}_w Cp_w}{2}\left\{\frac{2b_o}{k_{cl}A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff}A_i}\right\}\right]^{-1} + \frac{Q_{load}}{A_i}\left[\frac{1}{\alpha_i} + \frac{b_i}{k_{cl}}\right] \quad (35)$$

สุดท้าย ใช้สมการ (24) หาค่า $\dot{m}_w$ จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน

$$\dot{m}_{w,e} = \frac{Q_{rad} + Q_{nc} + gA_o(h_\infty - h_w)}{h_{Mw} - h_w} \quad (36)$$

เมื่อ

$$h_\infty = Cp_a(T_\infty - T_{ref}) + \left[(Cp_v - Cp_a)(T_\infty - T_{ref}) + \lambda_{ref}\right]\omega_{v,\infty}$$
$$h_w = Cp_a(T_w - T_{ref}) + \left[(Cp_v - Cp_a)(T_w - T_{ref}) + \lambda_{ref}\right]\omega_{v,w}$$
$$h_{Mw} = Cp_w(T_w - T_{ref})$$

และ $\lambda_{ref}$ = 2,503 kJ/kg คือความร้อนแฝงของน้ำที่อุณหภูมิ $T_{ref}$ = 0 °C

## 2.4 **คอนกรีต** (Concrete)

คอนกรีต เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี ต่อกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่ผสม และยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

2.4.1 คุณสมบัติของคอนกรีต

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัด ในขณะที่ความสามารถรับแรงดึงได้ต่ำประมาณ 10% ของแรงอัด แต่ถ้าต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ต้องเพิ่มเหล็กเส้น

เข้าไปในคอนกรีต เพื่อเหล็กจะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต และมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญดังนี้

ที่อุณหภูมิ 20 °C คอนกรีตมีความหนาแน่น (Density) $\rho = 1{,}900–2{,}300$ kg/m$^3$ มีความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) $c_p = 879$ J/kg-K มีสภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) $k = 0.814\text{-}2.120$ W/m-K และมีสภาพการแพร่ทางความร้อน (Thermal Diffusivity) $\alpha = 4.9\text{-}6.97$ m$^2$/s

2.4.2 วัสดุส่วนผสมของคอนกรีต

วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมีดังนี้

– ปูนซีเมนต์ทำหน้าที่ประสานมวลในคอนกรีต มีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามวัตถุประสงค์ของคอนกรีต

– วัสดุผสมย่อยอย่างละเอียด การก่อสร้างในประเทศไทยวัสดุผสมย่อยอย่างละเอียดจะใช้ทรายเป็นตัวแทรกประสาน ที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ) ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทนและปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงมาก และทรายที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติที่สะอาดแข็งแกร่ง ทนทาน ไม่มีสารเคมีหรืออินทรียวัตถุเจือปน เพราะจะทำให้การยึดเหนี่ยวของปูนซีเมนต์เสียกำลังก่อนที่จะนำทรายมาใช้ต้องร่อนให้สะอาดก่อน

– วัสดุผสมย่อยอย่างหยาบ ใช้หินย่อยขนาดที่เหมาะกับการผสมคอนกรีต คือต้องไม่ใหญ่เกินไปเพราะทำให้ไม่สามารถเทเข้าไปในระหว่างแบบหล่อกับเหล็กเสริมของคานหรือเสาได้ในกรณีที่ทำคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับหินย่อยที่ใช้ผสมควรมีขนาดที่คละกัน เช่น หินเบอร์ 2 และหินเบอร์ 1 เพื่อลดช่องว่างระหว่างหินให้น้อยลง ทำให้คอนกรีตแข็งแรงแน่นและทนทาน

– น้ำ ที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องเป็นน้ำที่สะอาด ซึ่งในการก่อสร้างส่วนมากมักระบุว่าต้องเป็นน้ำสะอาดที่ใช้ดื่ม เช่น น้ำประปา เพราะน้ำที่มีสารปนเปื้อนหรือไม่สะอาดอาจจะทำให้วัสดุผสมในคอนกรีตผุกร่อน คอนกรีตแข็งตัวช้า หรือกำลังลดลง ถ้าหากงานก่อสร้างนั้นอยู่ใกล้ทะเลและมีความจำเป็นต้องใช้น้ำทะเลมาผสม เช่น ที่ท่าเรืออู่ตะเภา สามารถใช้น้ำยาผสมกันซัลเฟตผสมเพิ่ม อุณหภูมิที่ดีที่สุดของน้ำที่นำมาผสมคอนกรีตคือ 20 ℃

– น้ำยาผสมคอนกรีต มีหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆของคอนกรีตให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน เช่น ต้องการให้คอนกรีตกันน้ำได้ให้คอนกรีตแข็งตัวช้า เป็นต้น

2.4.3 การเก็บรักษาวัสดุส่วนผสมของคอนกรีต

การเก็บรักษาวัสดุก่อนที่จะนำไปผสมเป็นคอนกรีต ด้วยวิธีที่ถูกต้องมีดังนี้

– การเก็บปูนซีเมนต์สถานที่เก็บควรมีหลังคาและมีฝาผนัง เพื่อป้องกันน้ำฝน ความชื้นที่จะทำให้ปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพ ปูนซีเมนต์ที่บรรจุถุงต้องกองซ้อนกันบนพื้นที่ยกสูง เพื่อป้องกันน้ำไหลผ่าน

– การเก็บวัสดุผสมอย่างละเอียดและวัสดุผสมย่อยอย่างหยาบ ควรกองแยกขนาดกัน ในบริเวณพื้นที่ที่ปลอดภัยจากสารเคมีน้ำมัน และพื้นที่ที่มีน้ำไหลผ่าน

– การเก็บสารผสมเพิ่ม ควรเก็บในสถานที่ที่มีหลังคาคลุมและเก็บรักษาตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เพื่อป้องกันการเสื่อมคุณภาพจากความร้อน ความชื้น การละลายตัวของสาร

คอนกรีตมีใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งรวมถึง อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้างต่าง ๆ ซึ่งมีเห็นได้ทั่วไป ทั้งนี้ คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมาเป็นเวลาช้านาน จากหลักฐานพบว่ามีการใช้คอนกรีตทำพื้นกระท่อมของชาวประมงและพวกล่าสัตว์สมัยยุคหิน บริเวณริมฝั่งแม่น้ำดานูป ตั้งแต่ 7600 ปี ที่ผ่านมา หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาคอนกรีตอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10% ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึง จะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตโดยจะเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรง หรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกกัน (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต ซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย

นอกจากนี้ในงานก่อสร้างยังมีการใช้วิธีการที่เรียกว่า คอนกรีตอัดแรง โดยทำการใส่แรงเข้าไปในคอนกรีตหล่อสำเร็จที่หล่อมาจากโรงงาน โดยเมื่อนำไปใช้งาน แรงที่ใส่เข้าไปในคอนกรีตจะหักล้างกับน้ำหนักของตัวคอนกรีตเองและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยงานสะพานและทางยกระดับ นิยมใช้คอนกรีตอัดแรง

## 2.5 เห็ดนางฟ้าและเห็ดนางฟ้าภูฏาน

เห็ดนางฟ้า (Phoenix Oyster Mushroom) มีชื่อสามัญคือ Sajor-caju ชื่อวิทยาศาสตร์ *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Sing มีวงจรชีวิตแบบผสม (Heterothallic) ลักษณะสัณฐานของเห็ดนางฟ้าจะประกอบไปด้วยส่วนของหมวกดอก (Cap) ก้านดอก (Stalk) ครีบดอก (Gills) และเส้นใย (Mycelium) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-6 cm มีก้านดอกไม่สมดุล (Eccentric) ออกดอกเป็นดอกเดียวหรือเป็นกลุ่ม สปอร์ของเห็ดมีขนาดประมาณ 3.5x8.6 $\mu m^2$ เป็นเห็ดที่มี

คุณค่าทางอาหาร มีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง ไขมันต่ำ อุดมไปด้วยธาตุอาหารต่าง ๆ และกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย มีรสชาติดี มีความกรอบ และเก็บไว้ได้นาน

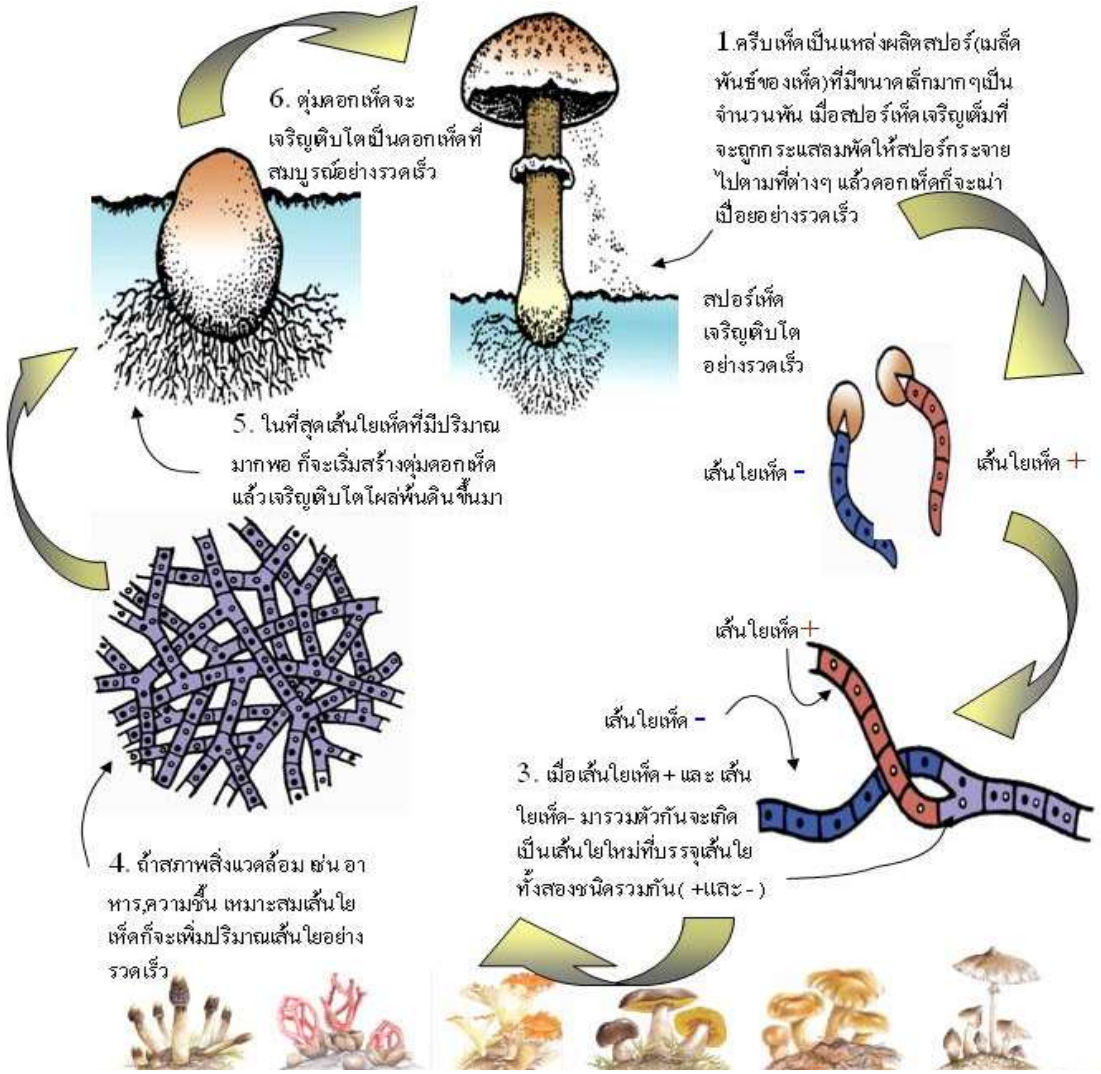
เห็ดนางฟ้าภูฐาน (Bhutan Oyster Mushroom) เป็นเห็ดตระกูลเดียวกับเห็ดนางฟ้า ซึ่งพบที่ประเทศภูฐาน จัดเป็นเห็ดในกลุ่มกินอยู่กับอินทรียวัตถุ (Saprophytes) คือเป็นเห็ดที่กินซากพืช หรือย่อยสลายซากพืช เช่น กินต้นไม้ที่ตายแล้ว ฟาง หญ้าแห้ง ขี้เลื่อย เศษพืชต่าง ๆ ใบไม้ จะถูกเห็ดรายย่อยสลายให้ผุกร่อนลดรูปกลายเป็นสารอินทรีย์ปนไปกับดิน (ชมรมนักเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย, 2542, หน้า 40) เจริญเติบโตได้เร็วมากในบริเวณที่อากาศชื้นและเย็น ดอกเห็ดมีสีขาวจนถึงสีน้ำตาลอ่อน หมวกดอกเนื้อแน่นสีคล้ำ ก้านดอกสีขาว ขนาดยาวไม่มีวงแหวนล้อมรอบ ครีบดอกสีขาวอยู่ชิดติดกันมากกว่าครีบดอกเห็ดเป๋าฮื้อ เส้นใยค่อนข้างละเอียด และสิ่งที่เด่นกว่าเห็ดชนิดอื่นคือการออกดอกเห็ดเร็ว ระยะช่วงห่างของการออกดอกสั้น มีความสามารถในการใช้อาหารสูง ถ้าใส่อาหารมากผลผลิตก็มาก มีความต้านทานราสีเขียวและราสีดำสูง สามารถเพาะได้ตลอดปี เห็ดนางฟ้าภูฐานจึงเป็นผลิตผลทางเกษตรกรรมที่มีความสำคัญ ให้ผลผลิตสูง ประมาณ 300-350 กรัมต่อถุงก้อนเชื้อ 1 กิโลกรัม เป็นที่นิยมในการผลิต จำหน่าย และบริโภค อีกทั้งอุดมไปด้วยคุณประโยชน์ในด้านโภชนาการ (ปรีชา รัตนัง, 2555, หน้า 21)

ภาพที่ 6 เห็ดนางฟ้าภูฐานที่เจริญเติบโตจากถุงเชื้อ (สวนเกษตรสุขสถิตย์, 2556)

วงจรชีวิตของเห็ดนางฟ้า

เห็ดนางฟ้ามีวงจรชีวิตแบบผสม (Heterothallic) เห็ดที่เจริญเติบโตเต็มที่จะมีการสร้างสปอร์ที่บริเวณครีบดอก เมื่อสปอร์แก่ก็จะถูกปล่อยออกมา เมื่อไปตกบริเวณที่เหมาะสมจะเจริญไปเป็นเส้นใยขั้นแรก (Primary Mycelium) แต่ไม่สามารถพัฒนาตนเองไปเป็นเส้นใยขั้นที่ 2

(Secondary Mycelium) ต้องอาศัยการผสมกับเส้นใยระยะที่ 1 เส้นอื่นซึ่งเจริญมาจากสปอร์อื่น แล้วจึงจะพัฒนาไปเป็นเส้นใยระยะที่ 2 ได้ จากนั้นก็จะเจริญรวมเป็นกลุ่มก้อน ดอกเห็ดอ่อนที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมคล้ายสำลีจะค่อย ๆ ขยายโตขึ้น เนื้อเยื่อภายในเห็ดอ่อนที่มีแต่เส้นใยอัดแน่นเป็นก้อน จะพัฒนาอย่างช้า ๆ เจริญออกเป็นอวัยวะต่าง ๆ เมื่อดอกโตเต็มที่ก็จะสร้างสปอร์แล้วบานออกเพื่อกระจายสปอร์ต่อไป




ภาพที่ 7 วงจรชีวิตของเห็ดนางฟ้า (บุญเลิศ ไททัตกุล, 2558)

สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้า

1. อุณหภูมิ ในช่วงที่เป็นเส้นใยจนกระทั่งเป็นดอก อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 21-30 °C ดอกเห็ดจะออกเร็วมาก หากอุณหภูมิต่ำกว่า 15 °C หรือสูงกว่า 35 °C เห็ดจะไม่ออกดอก หรือถ้าออกดอกแล้วก็จะชะงักการเจริญเติบโต และถ้าหนาวเกินไปจะมีสีซีดด้วย

2. อากาศ เห็ดต้องการออกซิเจนค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเวลาเกิดดอกเห็ด แต่ในโรงเรือนจะมีการสะสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการหายใจของเห็ด ถ้ามีคาร์บอนไดออกไซด์พอเหมาะจะช่วยกระตุ้นเส้นใยในการสร้างตุ่มเห็ด แต่ถ้ามีมากเกินไป เห็ดนางฟ้าจะมีลำต้นยืดยาวออกไป ดอกเห็ดบิดเบี้ยว มีขนาดเล็ก หรือไม่ออกดอก

3. ความชื้น การเพิ่มความชื้นในวัตถุเพาะทำได้โดยการรดน้ำ แต่ต้องระวังไม่ให้มากเกินไปเพราะจะทำให้อากาศในวัสดุเพาะจะลดลง ขาดออกซิเจน เส้นใยชะงักการเจริญเติบโต และอาจทำให้จุลินทรีย์อื่นที่อยู่ด้วยเจริญขึ้นแทนเส้นใยเห็ด แต่ถ้าขาดความชื้นก็จะไม่สามารถย่อยสลายอาหาร เส้นใยก็เจริญเติบโตไม่ได้ ส่วนความชื้นในอากาศนั้น ถ้ามีน้อยเกินไป นั้นน้ำในดอกเห็ดจะระเหยออกไป ทำให้ดอกเห็ดชะงักการเจริญ แต่ถ้าความชื้นมากเกินไป จะเกิดเส้นใยฟูขึ้นจากดอกเห็ด ทำให้ฉ่ำน้ำและการเกิดดอกเห็ดจะลดลงมาก

4. แสง มีความจำเป็นในการกระตุ้นให้เส้นใยรวมตัวกันเพื่อให้เกิดดอกเห็ดเร็วขึ้น ในระยะเห็ดออกดอก หากมีแสงน้อยเกินไปดอกเห็ดจะไม่สมบูรณ์ แต่เห็ดนางฟ้านั้นต้องการแสงไม่มาก ขนาดที่เหมาะสมคือ สว่างพอที่จะอ่านหนังสือออก แสงสีน้ำเงินจะกระตุ้นการออกดอกของเห็ดนางฟ้ามากกว่าสีอื่น

5. ความสะอาด โรงเรือนที่ไม่สะอาดจะเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรคที่เป็นผลเสียต่อเห็ด การรักษาความสะอาด ทำได้โดยการไม่ให้โรงเรือนสกปรกรกรุงรังไปด้วยสิ่งที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเพาะเห็ด ไม่ปล่อยให้เศษก้อนเชื้อหกหล่นหมักหมมตามมุมต่าง ๆ มีทางระบายน้ำ

## 2.6 การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทย

### โรงเรือนสำหรับเปิดดอกเห็ด

เห็ดนางฟ้าจะออกดอกและเป็นดอกสมบูรณ์ได้ดี ในอากาศที่มีความชื้นสูงประมาณ 60-80 % ขึ้นไป จึงจำเป็นต้องเพาะเห็ดในโรงเรือนที่เก็บความชื้นได้ในระดับดังกล่าว โดยทั่วไปหากผลิตเพื่อจำหน่าย จะนิยมสร้างโรงเรือนขนาด 4×6 $m^2$, 6×6 $m^2$, 8×16 $m^2$ หรือ 8×20 $m^2$ แล้วแต่ขนาดของพื้นที่และความต้องการของผู้ผลิต และปัจจุบันมีการผลิตเพื่อรับประทานในครัวเรือน หรือเป็นงานอดิเรก จะเพาะเพียงจำนวนน้อยและ ไม่มีพื้นที่มาก บ้างก็ใช้ไม้มาต่อเป็นตู้

ขนาดตามความสะดวก ใช้ผ้าพลาสติกปิดโดยรอบ ด้านหนึ่งคลุมให้เปิด-ปิด สามารถรดน้ำและเก็บเห็ดได้สะดวก ตู้นี้จะต้องวางในมุมอับลมและไม่ถูกแดดส่องโดยตรง นอกจากนี้ ปัจจุบันยังนิยมใช้โอ่งดินเผาหรือวงบ่อซีเมนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันในการกักเก็บความชื้น ต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถใช้โอ่งดินเผาหรือวงบ่อซีเมนต์ที่แตกชำรุดแล้วมาประยุกต์ได้ มีความสะดวกในการดูแล รดน้ำ ตลอดจนการเก็บเห็ด โดยนำโอ่งดินเผาหรือวงบ่อซีเมนต์มาวางในแนวนอน สำหรับวงบ่อซีเมนต์จะปิดด้านหนึ่งให้สนิทเหมือนกับก้นโอ่งดินเผา และอีกด้านหนึ่งจะใช้วัสดุคลุมที่ทึบแสงแต่มีรูระบายอากาศบ้าง เช่น กระสอบป่าน เป็นต้น

ภาพที่ 8 โรงเรือนเพาะเห็ด (บ้านเห็ดปทุม ธัญบุรี คลอง11, 2558)

ภาพที่ 9 เห็ดที่เพาะในโรงเรือน (บ้านเห็ดปทุม ธัญบุรี คลอง11, 2558)

ภาพที่ 10 ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดทำจากตู้ไม้ (บ้านเห็ดปทุม ธัญบุรี คลอง11, 2558)

**ลักษณะก้อนเชื้อที่นำมาเพาะ**

ก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าที่เหมาะสำหรับนำมาเปิดดอกให้ความชื้น เพาะให้เป็นดอกนั้น ควรจะมีเส้นใยสีขาวทั่วตลอดทั้งก้อนแล้ว จับตัวเป็นก้อนแข็งดีพอสมควรไม่เหลวเละ ก้อนเชื้อเห็ดที่มีอายุมากอาจมีสีขาวจัดและอาจมีตุ่มเห็ดสีขาวขึ้นมาบ้างแล้ว เมื่อนำไปเปิดดอกจะได้ดอกเห็ดเร็วในประมาณหนึ่งสัปดาห์ ถ้าหากก้อนเชื้อมีอายุมากเกินไป จะมีน้ำสีเหลืองข้างถุงซึ่งเกิดจากเส้นใยแตกตัวลงเอง (Autolysis) เมื่อนำไปเปิดดอกจะเกิดดอกเห็ดเร็วมากแต่ผลผลิตรวมต่ำ

การวางถุงก้อนเชื้อในโรงเรือน สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. เปิดจุกสำลีให้ออกดอกเห็ดที่ปากถุง จะวางถุงในแนวนอนกับพื้น โดยวางซ้อนกันเป็นชั้น พ่นละอองน้ำเป็นฝอยละอียด เห็ดจะเกิดแล้วโผล่ออกมาทางปากถุงได้เอง เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด สามารถให้ผลผลิตได้หลายรุ่น เมื่อเก็บผลผลิตได้ 2-3 รุ่น ก้อนเชื้อจะยุบตัวลงมา ทำให้ถุงเชื้อแน่นอยู่ตลอดเวลา เส้นใยเห็ดสามารถส่งอาหารเพื่อทำให้เกิดดอกเห็ดใหม่ได้อีกหลายครั้ง แต่ก้อนเชื้อชั้นล่าง ๆ มักจะถูกทำลายด้วยราเมือก หรือเน่าเปื่อยเสียก่อน ดังนั้น จึงไม่ควรวางซ้อนกันเกิน 12 ถุง

2. พับปากถุง หลังจากที่แกะคอขวดออกแล้วให้เปิดปากถุงพับลงมา ม้วนปากถุงให้อยู่ในระดับเดียวกับวัสดุเพาะหรือก้อนเชื้อ อาจวางก้อนเชื้อเห็ดได้ทั้งแนวนอนหรือแนวตั้งบนชั้น โดยวางชิด ๆ กัน จะเกิดดอกเห็ดครั้งละหลายดอกแต่ดอกเล็กลงเพราะแย่งอาหารกัน การวาง ก้อน

เชื้อเห็ดบนชั้นจะวางได้จำนวนถุงเชื้อน้อย จึงเก็บความชื้นได้น้อย แต่อากาศหมุนเวียนได้ดี จึงต้องคอยรักษาความชื้นในโรงเรือนไม่ให้แห้งเร็วเกินไป

3. ตัดปากถุง เป็นการเปิดปากถุงโดยใช้มีดโกนปาดปากถุงออกตรงส่วนคอขวด เหลือถุงพลาสติกหุ้มก้อนเชื้อส่วนบนอยู่บางส่วน วิธีนี้จะได้ดอกเห็ดน้อยกว่าการเปิดจุกสำลี แต่จะได้มวลเห็ดมากกว่า

4. กรีดข้างถุง เมื่อถอดและจุกสำลีออก รวบปากถุงรัดยางให้แน่น ใช้มีดคม ๆ กรีดข้างถุง ให้เป็นแนวยาวประมาณ 5-10 แถว หรือกีดแบบเฉียงเล็กน้อย ยาวประมาณ 6-8 cm หรือกรีดเป็นรอยกากบาทเล็ก ๆ ก็ได้ อาจวางถุงบนชั้นในแนวนอนแล้วกรีดด้านก้นถุงอีกด้านหนึ่ง หรือจะไม่วางบนชั้นแต่ใช้เชือกรัดปากถุงให้แน่น แขวนไว้ในแนวตั้งสลับสูงบ้างต่ำบ้าง ระยะห่างของถุงประมาณ 5-7 cm วิธีนี้จะเสียเวลาแต่โรงเรือนจะสะอาด โอกาสที่ก้อนเชื้อจะถูกรบกวนจากมดและไรน้อยกว่าการวางบนชั้น

5. การเปลือยถุง แกะถุงพลาสติกออกหมดทั้งก้อนแล้ววางเชื้อลงในแบบไม้หรือตะกร้า รดน้ำให้เปียกทั่วทั้งก้อน จะสามารถเกิดดอกเห็ดเร็วและเกิดได้ทุกส่วน แต่ต้องรักษาความชื้นในโรงเรือนให้สูงมาก เพราะก้อนเชื้อจะสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็ว และดอกเห็ดเล็กเพราะแย่งอาหารกัน

6. เพาะแบบแขวน ใช้เชือกไนล่อน 4 เส้น ผูกติดกันด้านหัวท้าย ส่วนตรงกลางใส่แผ่นพลาสติกแข็งเจาะรูร้อยเชือกทั้ง 4 เส้น ถ่างห่างออกจากกัน วางก้อนเชื้อซ้อนกันได้หลายถุง แขวนห้อยจากคานด้านบน พื้นเรือนเพาะจึงสะอาด ศัตรูเห็ดมีน้อย

**การรดน้ำ**

น้ำเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสร้างดอกเห็ด จึงต้องใช้น้ำสะอาด ปราศจากสารเคมีและสิ่งสกปรก ไม่มีกลิ่น และสารที่เป็นอันตรายต่อเห็ด เช่น เกลือแกง คลอรีน เป็นต้น จึงควรใช้น้ำฝน น้ำบ่อ น้ำบาดาล มีความเป็นกลาง เครื่องมือที่ใช้รดน้ำอาจเป็นระบบพ่นฝอย หรือฝักบัวที่ฝอยละเอียดมาก ๆ ในช่วงที่เห็ดยังไม่เป็นดอก จำนวนครั้งที่รดน้ำขึ้นอยู่กับความชื้นในอากาศรอบ ๆ ต้องให้มีความชื้นไม่ต่ำกว่า 80 % แต่ต้องระมัดระวังอย่าให้น้ำเข้าไปในก้อนเชื้อเห็ด จะทำให้เชื้อเห็ดเน่า เมื่อดอกเห็ดอายุ 1-2 วัน สามารถรดน้ำให้ดอกเห็ดเปียกได้ แต่เมื่อดอกเริ่มบานออกให้รดน้ำเพียงวันละ 2-4 ครั้ง ขึ้นกับลักษณะการขาดน้ำของเห็ด โดยรดไปตามพื้น เพดาน และด้านข้างของก้อนเชื้อ

**การเก็บเกี่ยวผลผลิตดอกเห็ด**

หลังจากเปิดดอกให้ความชื้นแล้ว ภายใน 2-3 สัปดาห์ จะเกิดดอกเห็ดเล็ก ๆ ถ้าหากดูแลรักษาต่อได้ดี ดอกเห็ดจะโตเต็มที่ภายใน 4-5 วัน ส่วนมากจะเก็บได้ในวันที่ 4 ถ้าปล่อยไว้นานกว่านั้น ดอกเห็ดจะสร้างสปอร์ออกมาเป็นผงสีขาวละเอียด หลุดร่วงหล่นลงมาด้านล่าง ดอกเห็ดจะเสียคุณภาพ จึงควรสังเกตลักษณะที่เหมาะสม คือ ก้านของดอกเห็ดจะหยุดการเจริญทางความยาว หมวกดอกเริ่มคลี่ออกประมาณครึ่งหนึ่งแล้วเริ่มสร้างสปอร์ ขอบดอกจะหนาและรวมตัวเข้าหากัน เมื่อเจริญเต็มที่แล้วขอบดอกจะคลี่ออกและบางลงกว่าเดิม เป็นระยะที่ควรเก็บเกี่ยวได้ โดยให้ใช้มือดึงที่โคนออกมาเบา ๆ ไม่ควรใช้มีดตัดเพราะเศษเห็ดที่ติดอยู่กับก้อนเชื้อจะเน่า เกิดเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรค โดยทั่วไปแล้ว ก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าสูตรธรรมดาขนาด 1 กิโลกรัม จะให้ผลผลิตครั้งละ 50-60 กรัม แต่ละก้อนจะให้ผลผลิตประมาณ 4-6 รุ่น แต่ละรุ่นมีช่วงห่างระหว่างการเกิดดอกประมาณ 10-15 วัน

## 2.7 การเพาะเห็ดในโอ่ง

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2012) ได้รายงานเกี่ยวกับการเพาะเห็ดในโอ่งไว้ว่า หลายปัจจัยที่ทำให้การทำเกษตรโดยทั่วไป ถูกปรับเปลี่ยนวิธีการและใช้แนวคิดใหม่ ๆ นอกกรอบ สืบเนื่องจากปัญหาและอุปสรรคอย่างแรกคือ พื้นที่เพาะปลูก รายจ่ายในอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องซื้อหา รวมทั้งระยะเวลา และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่อาจเป็นอุปสรรคในการให้ผลผลิต เป็นผลให้เกิดนวัตรกรรมทางความคิด ทำให้ได้รูปแบบใหม่ ๆ ในด้านเกษตรมากมาย

เห็ดโอ่งเป็นหนึ่งในนวัตกรรม ที่แตกแขนงออกมาเนื่องจากอุปสรรคที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดวิธีการใหม่ ๆ ที่ให้ผลผลิตไม่ต่างไปจากการเพาะเห็ดในแบบปกติ เพราะโดยทั่วไปการเพาะเห็ดจะต้องสร้างโรงเรือน ใช้เงินลงทุนสูง แต่ถ้าจะเพาะเพื่อการบริโภคในครัวเรือนแบบเศรษฐกิจพอเพียง ลดความยุ่งยากและไม่ต้องลงทุนสร้างโรงเรือน อีกทั้งใช้วัสดุเหลือใช้ในครัวเรือนมาใช้ให้เกิดประโยชน์คือ โอ่งแตก หรือโอ่งร้าว สามารถนำมาเพาะเห็ดได้ จึงได้เกิดวิธีการเพาะเห็ดโอ่งไม่ต้องใช้โรงเรือน ได้บริโภคในครัวเรือนอย่างเพียงพอ ได้เห็ดที่มีความสด คุณภาพดี และรสชาติอร่อยเช่นเดียวกับวิธีอื่น

ภาพที่ 11 ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดที่ทำด้วยโอ่ง (การทำเกษตรอินทรีย์แบบพอเพียง, 2558)

วัสดุและอุปกรณ์ในการเพาะเห็ดในโอ่งแบบมาตรฐาน

- โอ่งมังกร (โอ่งแตก หรือโอ่งร้าว) จำนวน 1 ใบ
- ก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าหรือเห็ดถุงชนิดอื่น ๆ จำนวน 20 ก้อน
- ตาข่ายพรางแสง หรือกระสอบป่าน สำหรับปิดปากโอ่ง จำนวน 1 ผืน
- ไม้ไผ่ตีเป็นตะแกรง ขนาดความกว้าง ยาว ให้พอดีกับขนาดโอ่งที่เตรียมไว้
- กรอบไม้ทำฐานรองพื้นโอ่ง (ด้านนอก)
- ทรายหยาบ รองพื้นโอ่ง
- เชือกฟาง

ขั้นตอนการเพาะเห็ดในโอ่ง

1. นำไม้ที่เตรียมไว้สำหรับทำฐานรองโอ่งด้านนอก มาตีล้อมกรอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยให้มีพื้นที่ว่างระหว่างกรอบไม้เพียงพอต่อการวางพื้นที่ผิวของโอ่งที่จะวางในแนวนอน ไม่ให้โอ่งกลิ้ง

2. นำโอ่งมานอนลง จัดหาสถานที่เหมาะ ๆ ใต้ร่มไม้หรือที่มีร่มเงา ให้อากาศถ่ายเทได้สะดวกขึ้น

3. นำทรายหยาบมาเทรองพื้นโอ่งที่วางไว้ในแนวนอน กะให้มีความหนาประมาณ 2-3 นิ้ว เพื่อกักเก็บความชื้น

4. นำตะแกรงไม้ไผ่ที่เตรียมไว้มาวางด้านในโอ่ง ทำเป็นแผงสำหรับวางก้อนเชื้อเห็ด โดยให้มีพื้นที่ว่างด้านบนมากกว่าพื้นที่ว่างด้านล่าง

5. นำก้อนเชื้อเห็ดที่ต้องการเพาะมาเรียงไว้จนเต็ม และทำการเปิดดอก ด้วยวิธีการเปิดจุกก้อนเชื้อด้านบน บังคับให้ดอกออกเป็นกระจุกด้านบน ก่อนวางเรียงก้อนเชื้อเห็ดจนเต็ม

6. ปิดปากโอ่งด้วยกระสอบป่านหรือตาข่ายพรางแสง แล้วใช้เชือกผูกยึดกระสอบกับขอบปากโอ่งให้แน่น โดยปล่อยชายกระสอบให้สามารถเปิดขึ้นลงได้

7. รดน้ำบนก้อนเชื้อเห็ด เช้า-กลางวัน-เย็น ถ้าพบว่ากองเห็ดแห้งเกินไป ควรเพิ่มความชื้นโดยใช้กระบอกฉีดน้ำ พ่นน้ำให้เป็นฝอยในโอ่ง เพื่อเป็นการให้ความชื้นแก่ก้อนเห็ด แล้วปิดปากโอ่งไว้ดังเดิม

ข้อแนะนำสำหรับการเพาะเห็ดในโอ่ง

- ควรระมัดระวังในช่วงวันที่ 1-3 ถ้าร้อนเกินไป ให้เปิดกระสอบป่านหรือตาข่ายพรางแสงเพื่อระบายความร้อน
- หลังเพาะประมาณ 1 สัปดาห์ จะเริ่มมองเห็นตุ่มสีขาวเล็ก ๆ เกิดขึ้นบนก้อนเชื้อเห็ด ในช่วงนี้ต้องระวังเรื่องการรดน้ำ อย่าให้ดอกเห็ดโดนน้ำเป็นอันขาด มิฉะนั้นดอกจะฝ่อและเน่าเสียหาย แต่ยังคงต้องพ่นน้ำให้ความชื้นอยู่ทุกวัน
- ประมาณ 7-10 วัน เห็ดจะออกดอกเก็บรับประทานได้ สามารถเก็บดอกเห็ดมารับประทานได้แล้วทุกวัน จนกว่าดอกเห็ดจะหมดไป ใช้เวลาประมาณ 1-3 เดือน
- น้ำที่ใช้สำหรับการรดก้อนเชื้อเห็ดจะต้องเป็นน้ำที่จืด มีค่า pH เป็นกลาง ไม่มีคลอรีนเจือปน เรื่องน้ำที่ใช้รดก้อนเห็ดนั้นสำคัญมาก ถ้าน้ำกร่อยหรือเค็มจะส่งผลให้เห็ดไม่ออกดอก
- น้ำที่ดีที่สุดคือ น้ำฝน หรือจะใช้น้ำประปาที่ผ่านการขจัดคลอรีนออกแล้วก็ได้ผลดีเช่นกัน (การรองน้ำประปาตากแดดทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน จะช่วยขจัดคลอรีนออกไปได้)

สำหรับการเพาะเห็ดในโอ่ง เป็นการนำเอาของใช้ที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นแนวทางในการประหยัดต้นทุน และสามารถนำไปเพาะได้ทุกครัวเรือน เห็ดที่จะนำมาใช้ในการเพาะแต่ละชนิดนั้น จะมีความต้องการและลักษณะนิสัยที่แตกต่างกัน เช่น เห็ดประเภทนางรม หูหนู และเป๋าฮื้อ จะต้องการสภาพอากาศที่ร้อนชื้นจนถึงสภาพอากาศตามปกติ ส่วนเห็ดนางฟ้า เห็ดหอม จะต้องการอากาศที่ค่อนข้างเย็นในการเจริญเติบโต การเพาะเลี้ยงเห็ดชนิดใด ๆ ควรจะมีการจัดการสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

ของเห็ดชนิดนั้น ๆ ในการผลิตดอกเห็ดแต่ละฤดูก็ควรมีการจัดการชนิดของเห็ดที่จะผลิตควบคู่ไปด้วย

การดูแลรักษาเห็ดในโอ่ง

– ข้อระวัง น้ำที่ใช้รดเห็ดจะต้องเป็นน้ำจืด ไม่มีคลอรีนเจือปน ไม่เป็นน้ำกร่อย น้ำเค็ม ระวังน้ำเค็มไม่สามารถจะใช้รดเห็ดได้ เพราะเห็ดจะไม่ออกดอก

– เห็ดแต่ละชนิดต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตดอกเห็ดไม่เหมือนกัน เห็ดนางรม เห็ดเป๋าฮื้อ และเห็ดหูหนู ต้องการอุณหภูมิธรรมดาในช่วงฤดูร้อนหรือฤดูฝน ส่วนเห็ดนางฟ้าและเห็ดหอม ต้องการอุณหภูมิค่อนข้างเย็น

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**งานวิจัยด้านสภาพแวดล้อมในการเพาะเห็ดนางฟ้า**

จากการศึกษาการเพาะเห็ดนางฟ้าของ อานนท์ เอื้อตระกูล และคณะ (อ้างถึงใน จรินทร์ บัวชม, 2539, 30) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการออกดอกของเห็ดนางฟ้า คือ 26-30 °C รองลงมา คือ 20-25 °C และ 26-30 °C ตามลำดับ

จากการศึกษาของวีระศักดิ์ ศักดิ์ศิริรัตน์ (อ้างถึงใน จรินทร์ บัวชม, 2539, หน้า 30) รายงานว่าเห็ดนางฟ้าจะออกดอกได้ดีในช่วงปลายฤดูฝนต่อต้นฤดูหนาว โดยเฉพาะในเดือนกันยายนถึงพฤศจิกายน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเพาะเห็ดนางฟ้ามาก

จากการศึกษาของ Jandaik และ Kapoor (อ้างถึงใน วสันต์ เพชรรัตน์, 2537, หน้า 174) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเพาะเห็ดนางฟ้า คือ 25 °C และการคลุมผิวหน้าวัสดุเพาะและแสงไม่มีผบต่อการเจริญของดอกเห็ด

จากการศึกษาของ Zadrazil (อ้างถึงใน จรินทร์ บัวชม, 2539, หน้า 30) พบว่า ในการเพาะเห็ด *Pleurotus* ในถุงพลาสติก ให้บ่มเชื้อเห็ดในห้องที่ไม่มีการระบายอากาศเป็นระยะเวลา 10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 75-90 % จะทำให้เส้นใยเห็ดเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาเพาะในโรงเรือนที่มีการระบายอากาศและให้ได้รับแสงวันละ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 10 วัน เห็ดจะออกดอก

**งานวิจัยด้านหม้อดินเก็บความเย็น**

Date (2012) ได้ทำการศึกษากระบวนการเก็บความเย็นของหม้อดินเนื่องมาจากการระเหยของน้ำในชั้นทรายเปียกซึ่งอยู่ในบริเวณพื้นที่ระหว่างหม้อใบเล็กและใบใหญ่ที่ซ้อนกัน โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันของค่าประสิทธิภาพอุณหพลวัตและอุณหภูมิในหม้อชั้นใน ซึ่งมาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการถ่ายโอนความร้อนและมวลผ่านผนังหม้อ อ้างอิงกับแบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ (Reynolds' Flow Model) และได้ข้อมูลว่า อัตราการระเหยของน้ำดังกล่าว มีความเกี่ยวข้องกับ 1) สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของผนังดินเหนียวและทรายเปียก 2) ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนซึ่งขึ้นกับพื้นที่ผิวของหม้อชั้นนอก และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (heat transfer coefficient) ภายนอก 3) สภาพการนำไฮดรอลิก (hydraulic conductivity) ของผนังดินเหนียว 4) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (mass transfer coefficient) และ 5) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของหม้อดิน ทั้งนี้ ในการแปรค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้ววิเคราะห์ผล พบว่าในช่วงที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมอยู่ระหว่าง 35 – 45 °C และ 30 – 50 % ตามลำดับ อุณหภูมิภายในหม้อที่เก็บไว้ได้จะแปรผันอยู่ในช่วง 23.06 - 37.33 °C

# บทที่ 3
# วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ดังที่ได้กำหนดวัตถุประสงค์และรายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในบทที่ 1 แล้วนั้น ผู้วิจัยมีวิธีดำเนินการศึกษาดังต่อไปนี้

## 3.1 กรอบแนวคิดของการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยแบ่งการดำเนินการออกเป็น 2 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา

ตอนที่ 2 การเปรียบเทียบมวลของเห็ดนางฟ้าภูฐาน ระหว่างเห็ดที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา กับเห็ดที่เพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ

## 3.2 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. วงบ่อซีเมนต์ หนา 5 cm สูง 50 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.90 m จำนวน 1 วง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.20 m จำนวน 2 วง
2. เชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐาน ขนาด 1 kg จำนวน 68 ถุง
3. ดาต้าล็อกเกอร์ (Data Logger) 2 เครื่อง
4. ตาข่ายลวด ขนาดช่อง 2.5 × 2.5 $cm^2$
5. ตาข่ายพรางแสงสีดำชนิด 80%
6. ไม้อัดหนา 10 mm 1 แผ่น
7. อิฐมอญ 18 ก้อน
8. เลื่อยฉลุไฟฟ้า
9. ทรายก่อสร้าง
10. เครื่องชั่งมวล
11. ขวดฉีดน้ำ / ขวดรดน้ำ
12. ช้อนสั้น
13. น้ำ

14. คอมพิวเตอร์

15. โปรแกรม IBM SPSS Statistics 22

## 3.3 ขั้นตอนและแนวทางการทดลองในการวิจัย

3.3.1 การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาทฤษฎีแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น วงบ่อซีเมนต์ และการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทย จากหนังสือ เอกสาร งานวิจัย เว็บไซต์ วารสารต่าง ๆ รวมไปถึงบุคคลในสาขาอาชีพที่มีความรู้ความชำนาญเกี่ยวข้องกับวงบ่อซีเมนต์และการเพาะเห็ดนางฟ้า เพื่อรวบรวมข้อมูล และประมวลความรู้ที่เกี่ยวข้องและความเป็นไปได้ ที่จะทำการวิจัย

3.3.2 การออกแบบห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน

นำข้อมูลที่ศึกษามาจากขั้นตอนที่ 3.3.1 มาใช้ออกแบบห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาและห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ โดยควบคุมให้มีปริมาตรภายในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบเท่ากันและตั้งอยู่ในบริเวณเดียวกัน

3.3.3 การศึกษาพารามิเตอร์กายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.3.1 ระบุค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) ค่าพารามิเตอร์เรขาคณิต $r_i$, $r_o$, $b_i$, $b_o$ และ $H$ ซึ่งวัดมาจากวงบ่อซีเมนต์ที่จะใช้ศึกษา 2) ค่าพารามิเตอร์จากสิ่งแวดล้อม $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ โดยใช้ค่าที่วัดได้จากบริเวณที่จะศึกษา และความร้อนจากการหายใจของอาหาร $Q_{load}$ โดยใช้ค่าประมาณตามทฤษฎีที่ศึกษามา (7-13 วัตต์) และ 3) ค่าของสมบัติเชิงอุณหพลวัต $Cp_w$, $Cp_a$, $Cp_v$, $K_H$, $k_a$, $k_{con}$ และ $k_{eff}$ โดยใช้ค่าที่ศึกษามาจากทฤษฎี

3.3.3.2 เนื่องจากไม่ทราบค่าอุณหภูมิ $T_w$ จึงต้องแก้ระบบสมการแบบวนซ้ำ (Date, 2012) ดังนี้

1) สมมติค่า $T_w$ และหาค่า $\omega_{v,w}$ จากความสัมพันธ์ที่กำหนดให้ในภาคผนวก (Crawford, Kays, 1993 cited in Date, 2012)

2) ใช้ค่าที่กำหนด $\Phi_\infty$ หาค่า $\omega_{v,\infty}$ จากความสัมพันธ์ที่กำหนดให้ในภาคผนวก (Wagner, Pruss, 1993 cited in Date, 2012) แล้วนำมาใช้หาค่าเฉลี่ย $\omega_{v,mean} = 0.5(\omega_{v,\infty} + \omega_{v,w})$ และหาค่า $Cp_m = Cp_a(1-\omega_{v,mean}) + Cp_v\omega_{v,mean}$

3) หาค่า $\alpha_o$ ตามความสัมพันธ์ที่กำหนดในภาคผนวก (McAdams, 1954 cited in Date, 2012) ซึ่งสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติจากผิวในแนวดิ่งจะใช้ $Nu_H = 0.59(Gr_H \Pr)^{0.25}$ โดยที่

$$Nu_H = \frac{\alpha_o H}{k_a} \qquad \text{และ} \qquad Gr_H = \frac{9.81\beta(T_\infty - T_w)H^3}{\nu_a^2}$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร $\beta = 1.0/T_{mean}$ และ $T_{mean} = 0.5(T_w + T_\infty)$ (ในหน่วยเคลวิน) ซึ่งต้องใช้ค่า $\Pr$, $k_a$ และ $\nu_a$ ที่ $T_{mean}$ (Incropera et al., 2013)

4) เมื่อทราบ $\alpha_o$ หาค่า $g$ จากสมการ (20) และจะได้ $Bi_m$, $B^*$ และ $\dot{m}_{w,m}$ จากสมการ (23)

5) หาค่า $(Q_{rad} + Q_{nc}) = (\alpha_{rad} + \alpha_o)A_o(T_\infty - T_w)$ เมื่อ $\alpha_{rad} = \varepsilon\sigma(T_\infty^2 + T_w^2)(T_\infty + T_w)$

6) หาค่า $\dot{m}_{w,e}$ จากสมการ (36)

7) คำนวณร้อยละความแตกต่าง $F = \left|\frac{\dot{m}_{w,e} - \dot{m}_{w,m}}{\dot{m}_{w,m}}\right| \times 100$ ถ้า $F > 0.01$ แก้ไขค่า $T_w$ แล้วไปขั้นตอนที่ 1)

8) ทำต่อเนื่องไปจนกว่าค่า $F$ จะลู่เข้า 0.01 จึงจะได้ค่า $T_w$ ที่ใช้ได้ จึงนำไปเป็นค่าที่ใช้หา $T_{cold}$

9) คำนวณหาค่า $T_{dp}$ จากความสัมพันธ์ดังในภาคผนวก (Wagner & Pruss, 1993 cited in Date, 2012) และหาค่า $\eta_{th}$ จากสมการที่ (16)

เมื่อได้ค่า $T_{cold}$ อยู่ในช่วงที่สอดคล้องใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่ศึกษามาแล้ว และได้ค่า $0 < \eta_{th} < 1$ จึงสามารถนำแบบไปสร้างเป็นห้องเพาะเลี้ยงเห็ดดังที่ออกแบบได้

3.3.4 การสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นและทดลองเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยง มีขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.4.1 เลื่อยไม้อัดหนา 10 mm ให้เป็นวงแหวนขนาดรัศมีภายในและภายนอกเป็น 15 cm และ 60 cm ตามลำดับ นำไปวางให้ได้ระดับและสมดุลบนอิฐมอญที่วางเรียงไว้ในแนวรัศมีบนพื้นบริเวณที่จะเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน

3.3.4.2 นำวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 120 cm วางลงบนแผ่นไม้อัดในขั้นตอนที่ 3.3.4.1 ให้ฐานของวงบ่อซีเมนต์ชิดขอบนอกของวงแหวนไม้อัดพอดีทุกด้าน

3.3.4.3 นำวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 cm วงลงตรงกลางของวงบ่อซีเมนต์ในขั้นตอนที่ 3.3.4.2 จะเหลือพื้นที่วงแหวนไว้ภายในกว้างเชิงรัศมีประมาณ 25 cm สำหรับวางถุงเชื้อเห็ดที่จะเพาะเลี้ยง

3.3.4.4 เติมทรายลงในช่องว่างระหว่างวงบ่อซีเมนต์ทั้งสองจนเต็ม แล้วรดน้ำลงในชั้นทรายให้เปียกชื้นโดยทั่ว จะสังเกตว่ามีน้ำไหลออกทางด้านล่างของห้องเพาะเลี้ยง แสดงว่าทรายอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว

3.3.4.5 นำดาต้าล็อกเกอร์ V (Vertical) มาวางที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องเพาะเลี้ยง และนำดาต้าล็อกเกอร์ H (Horizontal) มาติดตั้งด้านนอก ในบริเวณที่สร้างห้องเพาะเลี้ยง แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในและภายนอกห้องเพาะเลี้ยงทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ ให้ปิดห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าด้านบนด้วยตาข่ายพรางแสงสีดำชนิด 80% และล้อมด้วยตาข่ายลวด เพื่อป้องกันสัตว์มารบกวน

3.3.4.6 วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากดาต้าล็อกเกอร์ทั้งสองเครื่องในประเด็นต่อไปนี้

- ความสอดคล้องของค่าอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานระหว่างค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีในขั้นตอนที่ 3.3.3 กับค่าที่วัดได้จากห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา
- แนวโน้มและความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา
- ความสอดคล้องของค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา กับค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่ได้ศึกษามาในขั้นตอนที่ 3.3.1 ทั้งนี้หากพบว่ามีความแตกต่างมากจนอาจมีผลที่ไม่ดีต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน จะต้องศึกษาหาสาเหตุ และดำเนินการแก้ไขแบบในขั้นตอนที่ 3.3.2 ปรับปรุงห้องเพาะเลี้ยง และวัดค่าใหม่จนได้ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะเลี้ยงอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน

3.3.4.7 จากผลการศึกษาพารามิเตอร์กายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาในขั้นตอนที่ 3.3.3 หากพบว่าพารามิเตอร์ใดมีอิทธิพลมากอย่างเด่นชัด ให้เลือกมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมที่วัดได้ในขั้นตอนที่ 3.3.4.5

3.3.5 การสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานแบบปกติ มีวิธีดังต่อไปนี้

- นำวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 cm วางในแนวนอนบนพื้นบริเวณที่จะเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน โดยให้ปากท่อด้านหนึ่งอยู่ชิดกับผนัง (หากไม่มีผนังควรมีแผ่นไม้มาปิดแทน) แล้วใช้อิฐมอญวางดักทั้งสองด้าน ป้องกันท่อกลิ้ง

3.3.6 การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงที่สร้างขึ้นทั้งสองแบบ ดังในขั้นตอนที่ 3.3.4 และ 3.3.5

- นำถุงเชื้อเห็ดที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวเต็มถุงดีแล้วมาเปิดดอก เขียนป้ายชื่อที่ถุงเชื้อเห็ดทุกถุง โดยเรียงลำดับ V1, V2, V3, … , V34 และ H1, H2, H3, … , H34 แล้วนำไปวางเรียงอย่างเป็นระเบียบในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ แยกตามชื่อที่กำหนด โดยถุงเชื้อเห็ด V (Vertical) หมายถึง ถุงเชื้อเห็ดที่วางในแนวตั้งในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา และถุงเชื้อเห็ด H (Horizontal) หมายถึง ถุงเชื้อเห็ดที่วางในแนวนอนในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ ทั้งนี้ จะต้องวางถุงเชื้อเห็ด V เรียงกันไปตามพื้นที่ของวงแหวนไม้อัดจนเต็ม และวางถุงเชื้อเห็ด H เรียงซ้อนกันให้ได้จำนวนเท่ากันกับถุงเพาะเชื้อเห็ด V คือห้องละ 34 ถุง

- คลุมห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบด้วยตาข่ายกรองแสงสีดำชนิด 80% และปิดล้อมด้วยตาข่ายลวด ป้องกันสัตว์มารบกวน

- ติดตั้งดาต้าล็อกเกอร์ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงทุก ๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 60 วัน

- สำหรับห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษานั้น รดน้ำปริมาณ 3 ลิตร ลงในชั้นทรายเปียกเวลาประมาณ 18.00 น. ทุกวัน (รดน้ำวันละ 1 ครั้ง ปริมาณรวม 3 ลิตร)

- สำหรับห้องเพาะเลี้ยงแบบปกตินั้น รดน้ำปริมาณ 3 ลิตร ลงบนถุงเชื้อเห็ดอย่างระมัดระวังมิให้น้ำเข้าไปในถุงเชื้อเห็ดทุกวัน เวลาประมาณ 6.00 น. และ 18.00 น. (รดน้ำวันละ 2 ครั้ง ปริมาณรวม 6 ลิตร)

- สังเกตการเจริญเติบโตของเห็ดที่เพาะทุกวัน เมื่อเห็ดออกดอกและเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ให้เก็บดอกเห็ดออกจากถุงเชื้อเห็ด นำไปวัดและบันทึกค่ามวลและขนาดของดอกเห็ดแต่ละถุง และทำความสะอาดปากถุงเชื้อเห็ดด้วยการใช้หางช้อนขูดรากเห็ดออก เพื่อให้เห็ดรุ่นต่อไปเจริญและงอกออกมาได้อีก

- หมั่นสำรวจเห็ดที่อาจงอกทางด้านอื่นของถุงเชื้อเห็ด ต้องกำจัดออกเพราะอาจทำให้เน่าและหมักหมมเชื้อราในห้องเพาะเลี้ยง รวมไปถึงแมลงต่าง ๆ ที่อาจเข้าไปกัดกินเห็ด หรือทำรังในที่อับอีกด้วย

3.3.7 วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยง และเปรียบเทียบมวลของเห็ดที่เก็บมาจากทั้งสองห้องเพาะเลี้ยง

## 3.4 สถานที่และระยะเวลาการดำเนินงาน

สถานที่ในการศึกษา คือ บริเวณข้างบ้านของผู้วิจัย ซึ่งอยู่ ณ บ้านเลขที่ 236/50 ถนนกันตัง ตำบลทับเที่ยง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง

ช่วงเวลาที่ศึกษา เมษายน 2558 – เมษายน 2559 ดังตารางการดำเนินงาน ต่อไปนี้

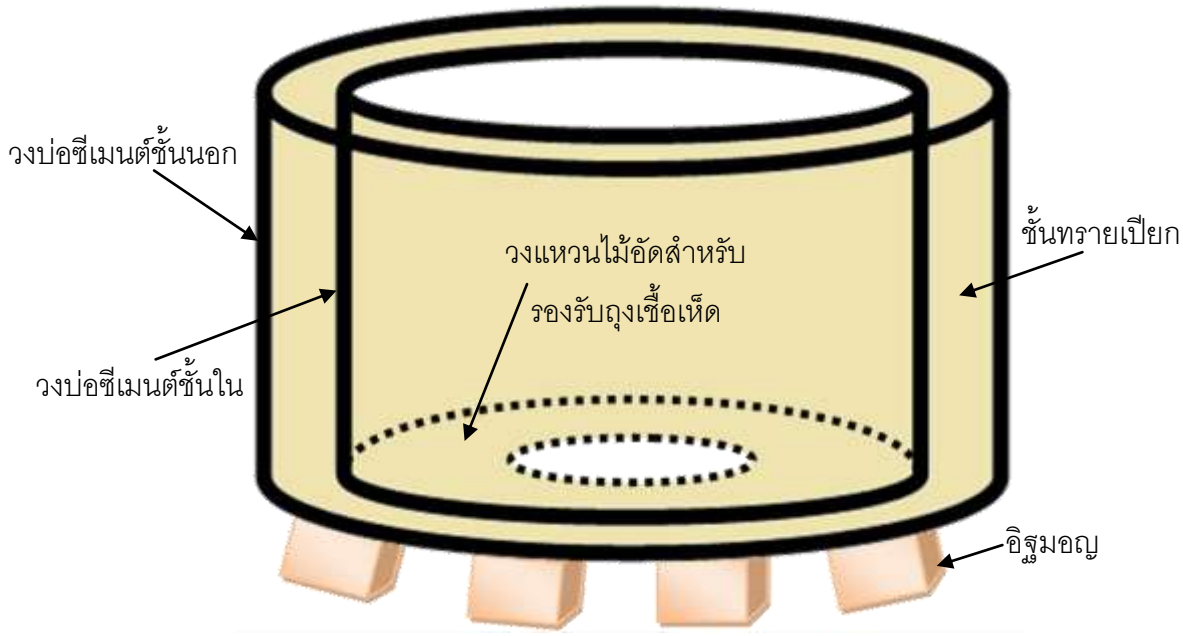
ตารางที่ 1 การกำหนดระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

| การดำเนินงาน | ช่วงเวลา | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | พ.ศ. 2558 | | | | | | | | | พ.ศ. 2559 | | | |
| | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| 1. การศึกษาทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง | ↔ | | | | | | | | | | | | |
| 2. สอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ | | ↔ | | | | | | | | | | | |
| 3. ออกแบบและวิเคราะห์ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นโดยใช้วงบ่อซีเมนต์แทนหม้อดิน | | | ↔ | | ↔ | | | | | | | | |
| 4. สร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และทดสอบความสอดคล้องกับทฤษฎี | | | | | ↔ | ↔ | | | | | | | |
| 5. ทดลองเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงที่สร้างตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นและห้องเพาะเลี้ยงวงบ่อซีเมนต์ตามที่เกษตรกรนิยมทำอย่างปกติ และเก็บข้อมูลมาศึกษา | | | | | | | ↔ | | ↔ | | | | |
| 6. การวิเคราะห์ผลการศึกษา และสรุปผลการวิจัย | | | | | | | | | ↔ | | | | |
| 7. เขียนรายงานผลการวิจัย | | | | | | | | | | ↔ | ↔ | | |
| 8. ตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัย | | | | | | | | | | | ↔ | | |
| 9. สอบวิทยานิพนธ์ | | | | | | | | | | | | ↔ | ↔ |

# บทที่ 4
# ผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานซึ่งสร้างขึ้นด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นดังขั้นตอนและรายละเอียดที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 นั้น ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูล และนำเสนอแยกเป็นประเด็นดังต่อไปนี้

## 1.1 การออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น




ภาพที่ 12 แบบห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

ภาพที่ 13 ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

จากการออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ดังภาพที่ 13 และ 14 ตามลำดับนั้น สามารถนำไปใช้เพาะเลี้ยงเห็ดซึ่งได้แสดงภาพประกอบไว้ในภาคผนวก ข ทั้งนี้ รวมไปถึง การเพาะเลี้ยงเห็ดในวงบ่อซีเมนต์ตามแบบที่เกษตรกรนิยมด้วย

## 1.2 การศึกษาปัจจัยกายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

การศึกษานี้ได้ใช้แนวคิดตามหลักการทำความเย็นด้วยการระเหยน้ำที่เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากด้านนอกของวงบ่อซีเมนต์ต้องมีค่ามากกว่าการนำความร้อนในทรายเปียกที่อยู่ระหว่างวงบ่อซีเมนต์ทั้งสองขนาดที่ซ้อนกัน และได้คำนวณตามหลักการอนุรักษ์มวลและหลักการอนุรักษ์พลังงานในสภาวะคงตัว เพื่อวิเคราะห์ผลจากการแปรค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางกายภาพที่มีต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในวงบ่อซีเมนต์ ซึ่งช่วยให้ทราบความเป็นไปได้ในการนำไปสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ทั้งนี้มีการกำหนดข้อมูลของสิ่งแวดล้อม ที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์นี้ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 40 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 20 – 80 % ซึ่งเป็นค่าที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน รวมไปถึงให้มีการสูญเสียความร้อนทางด้านบนและด้านล่างของห้องเพาะเลี้ยง มีค่าอยู่ในช่วง 7 – 13 W ซึ่งเป็นค่าที่คาดคะเนมาจากทฤษฎี (Date, 2012) ได้ผลดังนี้

### 1.2.1 การกำหนดตัวแปรควบคุม

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการศึกษาตามทฤษฎีหม้อดินเก็บความเย็น

| ขนาดของวงบ่อซีเมนต์ (m) | ความร้อนจำเพาะ (J/kg-K) | สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K) | สัมประสิทธิ์การนำไฮดรอลิก (m/s) | อื่น ๆ |
|---|---|---|---|---|
| $r_i = 0.4$<br>$r_o = 0.6$<br>$b_i = b_o = 0.05$<br>$H = 0.5$ | $Cp_a = 1{,}007$<br>$Cp_v = 1{,}872$<br>$Cp_w = 4{,}179$ | $k_a = 0.027$<br>$k_{con} = 1.73$<br>$k_{eff} = 2.0$ | $K_H = 6 \times 10^{-12}$ | $Q_{load} = 10\,\text{W}$<br>$\upsilon_a = 15.95 \times 10^{-6}\,\text{m}^2/\text{s}$<br>$T_{ref} = 273.15\,\text{K}$<br>$\lambda_{ref} = 2{,}503\,\text{kJ/kg}$ |

ในการศึกษานี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแปรควบคุม ดังที่แสดงในตารางที่ 2 เมื่อ $\upsilon_a$ คือความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ ($m^2/s$) และสำหรับค่าสถาพการนำความร้อนของคอนกรีตจะมีช่วงกว้างขึ้นอยู่กับสภาพและส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าสำหรับคอนกรีตมอตาร์ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.73 W/m-K (McAdams, 1954)

### 1.2.2 การคำนวณกรณีอ้างอิง

ตารางที่ 3 ผลจากการคำนวณกรณีอ้างอิง: $T_\infty = 30\,^\circ\text{C}$, $\Phi_\infty = 60\,\%$, $Q_{load} = 10$ W

| | | | |
|---|---|---|---|
| $T_w = 26.5513$<br>$T_o = 25.7061$<br>$T_i = 22.1487$<br>$T_{cold} = 25.5407$<br>$T_{dp} = 21.3704$ | $\dot{m}_w = 6.7605 \times 10^{-9}$<br>$Q_L = 65.1257$<br>$Q_{in} = 55.1258$<br>$COP = 0.1814$ | $\alpha_{nc} = 2.5167$<br>$\alpha_{rad} = 5.9634$<br>$Bi_m = 409{,}898.18$<br>$\eta_{th} = 0.5167$ | $g = 0.002459$<br>$B = 0.006238$<br>$B^* = 2.4303 \times 10^{-6}$<br>$\omega_{v,w} = 0.02189$ |

ผลการทดสอบทฤษฎีในแบบจำลองที่ศึกษา ดังข้อมูลในตารางที่ 3 โดยกำหนดสภาวะที่เป็นไปได้ในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในจังหวัดตรัง คือ $T_\infty = 30\,^\circ\text{C}$ และ $\Phi_\infty = 60\,\%$ สำหรับกรณี $Q_{load} = 10$ W เมื่อคำนวณหาค่า $T_w$ ที่ยอมรับได้ แล้วใช้คำนวณค่าอื่น ๆ จะพบว่า $T_i < T_o < T_w$, $T_{cold} > T_i$ และ $T_{dp} < T_{cold}$ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ส่งผลให้ได้ $\eta_{th} = 0.5167$ ที่เป็นไปได้ (น้อยกว่า 1) อีกทั้ง จะพบว่า $Q_L > Q_{in}$ และ $(Q_{in} + Q_{load}) > Q_L$ ซึ่งส่งผลให้ได้

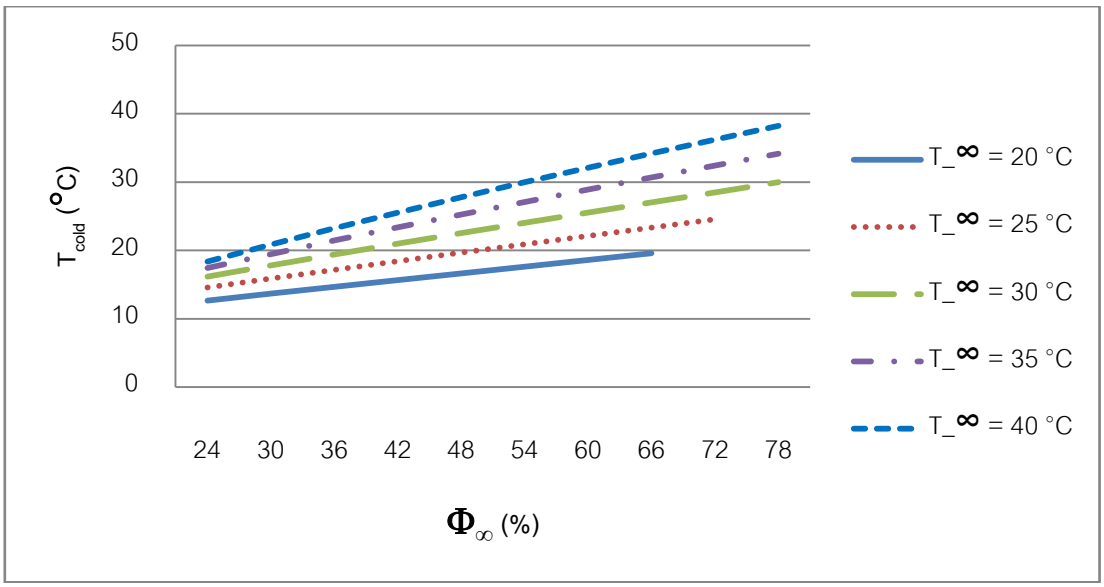
$COP = 0.1814$ ที่เป็นไปได้ (น้อยกว่า 1) นอกจากนี้ จะพบว่า $\alpha_{nc} < \alpha_{rad}$ ซึ่งแสดงถึงการได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเก็บความเย็นของห้องเพาะเลี้ยง สอดคล้องกับที่ได้ $T_w = 26.5513\,^{\circ}\mathrm{C}$, $\omega_{v,w} = 0.02189$ และเลขสปัลดิง $B = 0.006238$ ลดลงเป็น $B^* = 2.4303 \times 10^{-6}$ อันเป็นผลมาจากความต้านทานดาร์ซี และสุดท้ายจะพบว่า ค่าเลขบิโอต์ของการถ่ายโอนมวล $Bi_m >> 1$ ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ แสดงให้เห็นว่าทฤษฎีในการคำนวณและวิเคราะห์แบบจำลองนี้สมารถนำไปใช้ได้

### 1.2.3 ผลจากการแปรค่าพารามิเตอร์

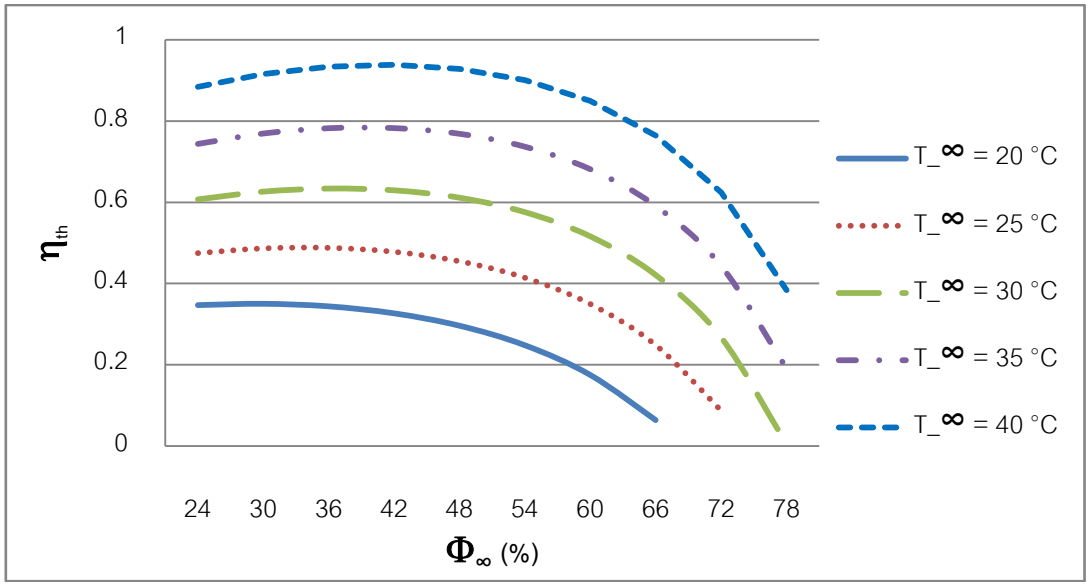
1.2.3.1 ผลจากการแปรค่า $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$

เมื่อนำข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 6 ในภาคผนวก ก) มาเขียนกราฟแสดงการแปรค่าของ $T_{cold}$ ในช่วงของ $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทย ดังที่ปรากฏในภาพที่ 14 จะเห็นว่าค่า $T_{cold}$ มีแนวโน้มในลักษณะแปรผันตาม $\Phi_\infty$ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงที่ $T_\infty$ มีค่าสูง (กราฟมีความชันมาก) อีกทั้งจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิ $T_\infty$ ต่ำคือ 20 °C และ 25 °C นั้น ไม่สามารถคำนวณค่า $T_{cold}$ ได้เมื่อค่า $\Phi_\infty$ เพิ่มขึ้นถึง 66% และ 72% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการได้ค่า $\eta_{th} < 1$ (ดังในภาพที่ 15) ซึ่งเป็นไปไม่ได้ตามทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตาม ค่า $T_{cold}$ ที่ได้มาทั้งหมดนั้น โดยภาพรวมถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน คือประมาณ 15 – 35 °C

ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 6 ในภาคผนวก ก) มาเขียนกราฟแสดงการแปรค่าของ $\eta_{th}$ ในช่วงของ $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ ดังที่ปรากฏในภาพที่ 15 จะเห็นว่าค่า $\eta_{th}$ จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\Phi_\infty$ มีค่าประมาณ 30-40 % และลดลงต่ำมากเมื่อ $\Phi_\infty$ มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 70% อีกทั้งยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิ $T_\infty$ ต่ำคือ 20 °C และ 25 °C นั้น จะได้ค่า $\eta_{th} < 1$ เมื่อค่า $\Phi_\infty$ เพิ่มขึ้นถึง 66% และ 72% ตามลำดับ

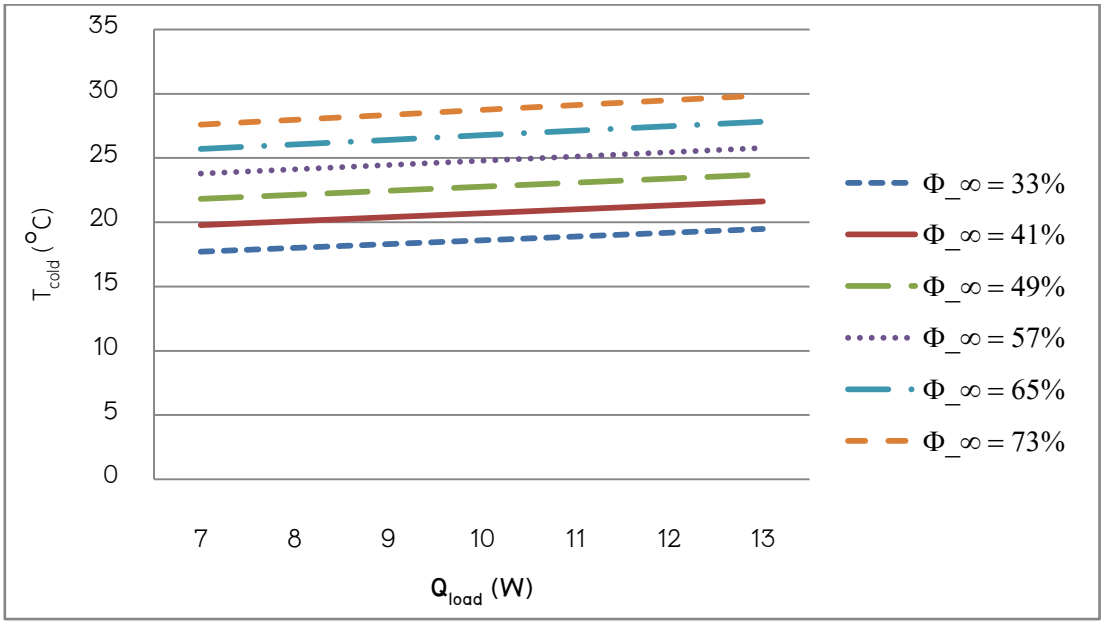



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $\Phi_{\infty}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

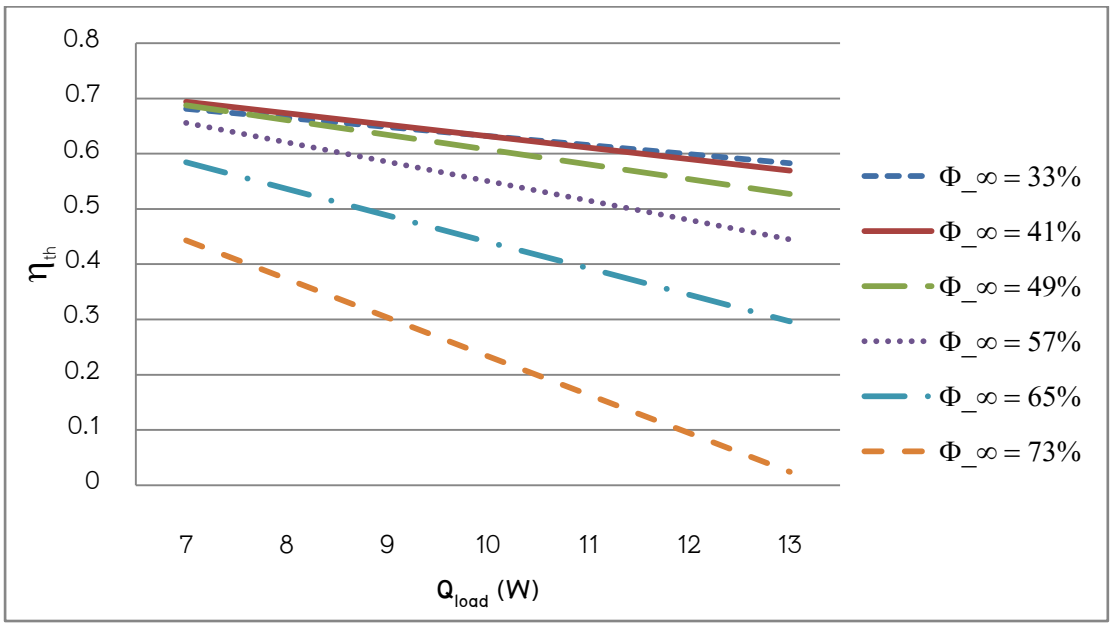



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $\Phi_{\infty}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

1.2.3.2 ผลจากการแปรค่า $Q_{load}$




ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $Q_{load}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น



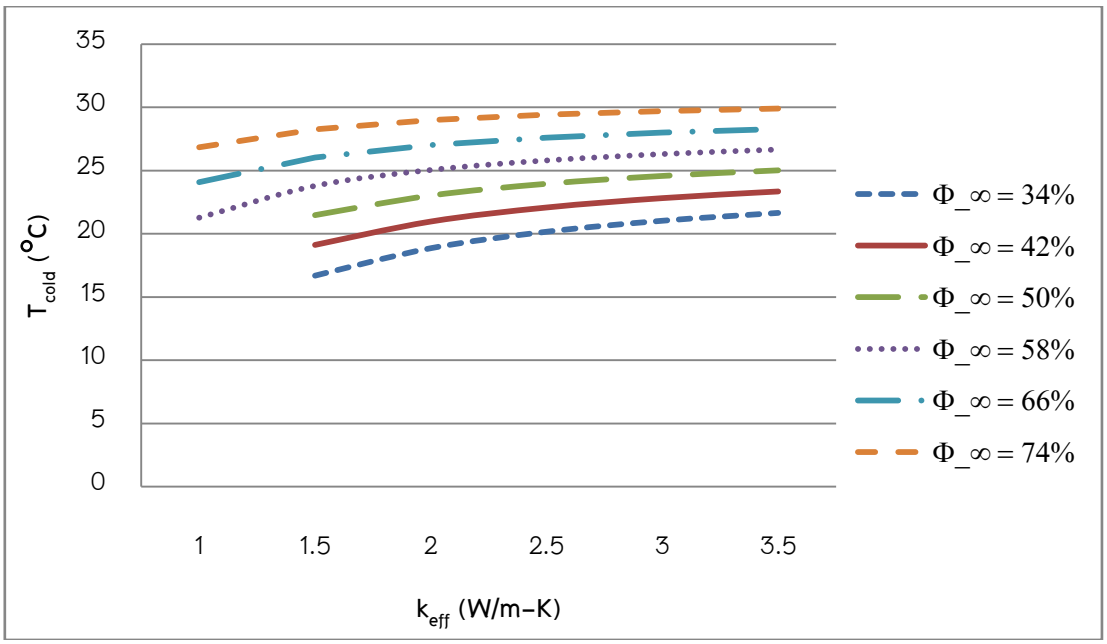

ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $Q_{load}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

ข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 7 ในภาคผนวก ก) ในภาพที่ 16 เมื่อให้ $Q_{Load}$ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 7-13 W จะเห็นว่าค่า $T_{cold}$ เพิ่มขึ้นประมาณ 2 – 3 °C ใกล้เคียงกันทุกค่า $\Phi_{\infty}$ ในขณะที่ค่า $\eta_{th}$ ลดลงแตกต่างกัน ดังในภาพที่ 17 ซึ่งสำหรับความชื้นสูงคือ $\Phi_{\infty}$ = 73% นั้น มีการลดลงของ $\eta_{th}$ ในอัตราสูงกว่าค่าอื่น อย่างไรก็ตาม สำหรับการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานเมื่อเห็ดงอกในระยะต่าง ๆ กันแล้ว ค่า $Q_{Load}$ ย่อมเปลี่ยนไปตามปริมาณเห็ดที่งอก จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

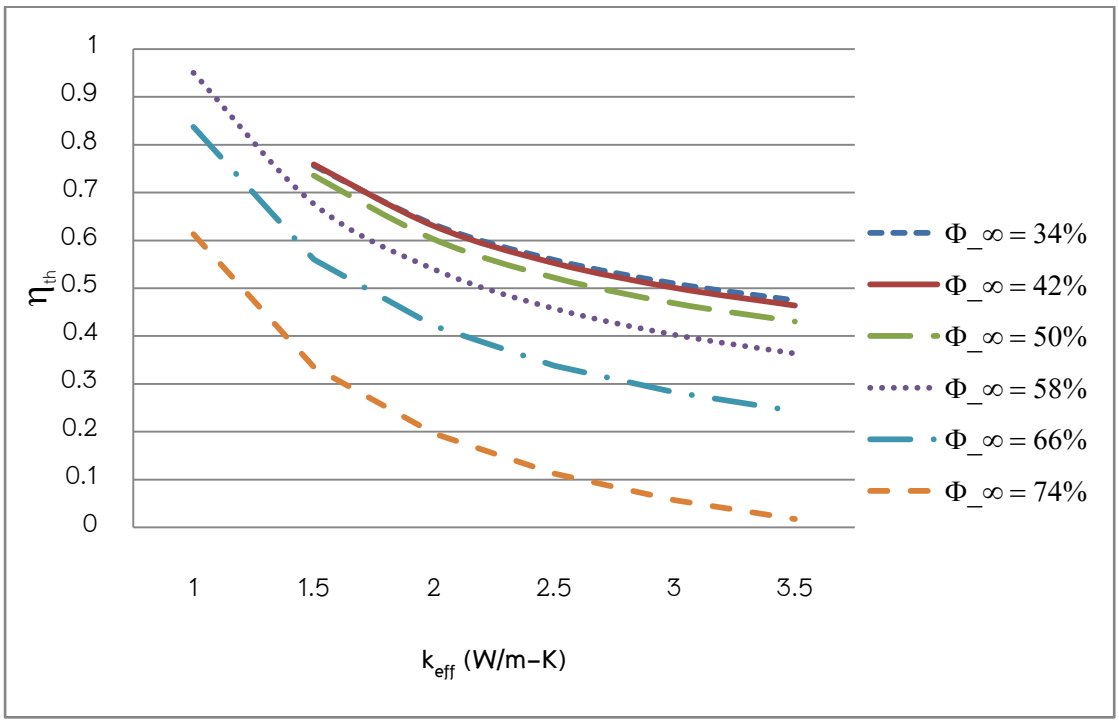
1.2.3.3 ผลจากการแปรค่า $k_{eff}$

จากข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 8 ในภาคผนวก ก) ในภาพที่ 18 เมื่อให้ค่า $k_{eff}$ เพิ่มขึ้นในช่วง 1 – 3.5 W/m-K จะได้ว่าค่า $T_{cold}$ เพิ่มขึ้นมากในช่วงที่ $k_{eff}$ มีค่าต่ำ และอัตราการเพิ่มค่อย ๆ ลดลงเมื่อ $k_{eff}$ มีค่าสูงขึ้น ซึ่งสำหรับ $\Phi_{\infty}$ = 34% นั้น มีการเพิ่มขึ้นของ $T_{cold}$ ในอัตราสูงกว่าค่าอื่น และยังพบว่า เมื่อค่า $k_{eff} < 1.5$ W/m-K จะไม่สามารถคำนวณค่า $T_{cold}$ สำหรับสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำกว่า 50% ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการได้ค่า $\eta_{th} > 1$ (ดังในภาพที่ 19) ซึ่งเป็นไปไม่ได้ตามทฤษฎี

จากข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 8 ในภาคผนวก ก) ในภาพที่ 19 พบว่าค่า $\eta_{th}$ จะมีค่าสูงและลดลงอย่างมากในช่วงที่ $k_{eff}$ มีค่าต่ำ และอัตราการลดค่อย ๆ ลดลงเมื่อ $k_{eff}$ มีค่าสูงขึ้น ซึ่งสำหรับความชื้นสูง $\Phi_{\infty}$ = 74% นั้น มีการลดลงของ $\eta_{th}$ ในอัตราสูงกว่าค่าอื่น ทั้งนี้ทรายเปียกที่ใช้จะมีค่า $k_{eff}$ แปรไปตามส่วนผสมและการระเหยของน้ำ จึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม



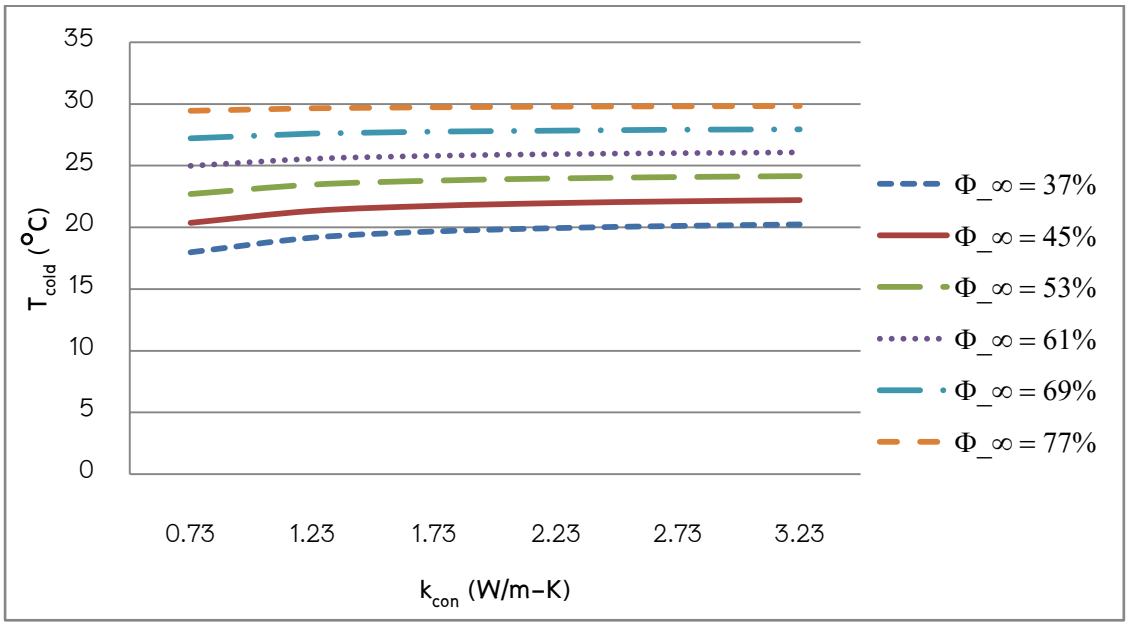

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $k_{eff}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น



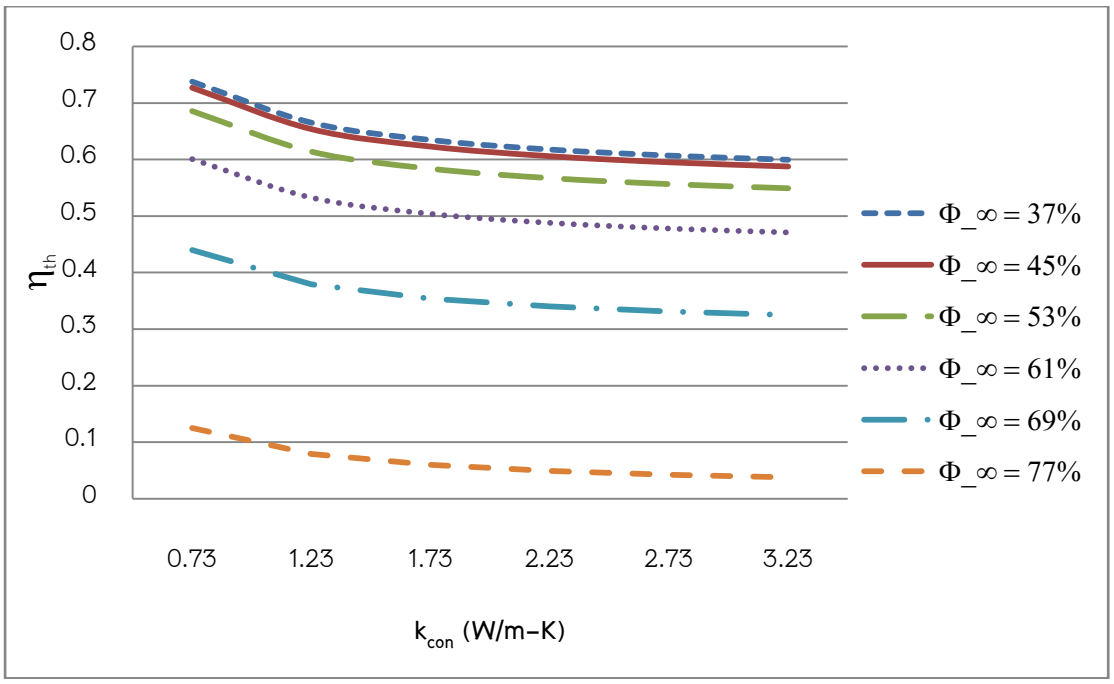

ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $k_{eff}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

1.2.3.4 ผลจากการแปรค่า $k_{con}$

ข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 9 ในภาคผนวก ก) ในภาพที่ 20 เมื่อให้ค่า $k_{con}$ เพิ่มขึ้นในช่วง 0.73 – 3.23 W/m-K จะได้ว่าค่า $T_{cold}$ เพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 – 2.5 °C ซึ่งสำหรับความชื้นต่ำ $\Phi_{\infty}$ = 37% นั้น มีการเพิ่มขึ้นของ $T_{cold}$ ในอัตราสูงกว่าค่าอื่น ในขณะที่ค่า $\eta_{th}$ ลดลงประมาณ 0.1 – 0.15 โดยจะลดลงอย่างมากในช่วงที่ $k_{con}$ มีค่าต่ำ ดังในภาพที่ 21 ซึ่งสำหรับความชื้นสูง $\Phi_{\infty}$ = 77% นั้น มีการลดลงของ $\eta_{th}$ ในอัตราสูงกว่าค่าอื่น ทั้งนี้ วงบ่อซีเมนต์ที่ใช้จะมีค่า $k_{con}$ แปรไปตามสภาพและส่วนผสมของคอนกรีต จึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม




ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ของค่า $T_{cold}$ กับค่า $k_{con}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น




ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ของค่า $\eta_{th}$ กับค่า $k_{con}$ ในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของ $T_{cold}$ และ $\eta_{th}$ อันเนื่องมาจากการแปรค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องตามทฤษฎี ซึ่งได้แก่ ค่า $T_\infty$, $\Phi_\infty$, $Q_{load}$, $k_{eff}$ และ $k_{con}$ ข้างต้น จะเห็นได้ว่า การแปรค่า $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ $T_{cold}$ และ $\eta_{th}$ เป็นอย่างมาก จึงนำไปสู่การศึกษาความสัมพันธ์ของ $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ที่วัดได้จริงจากห้องเพาะเลี้ยง กับค่า $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ ในลำดับต่อไป

## 1.3 การทดลองเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

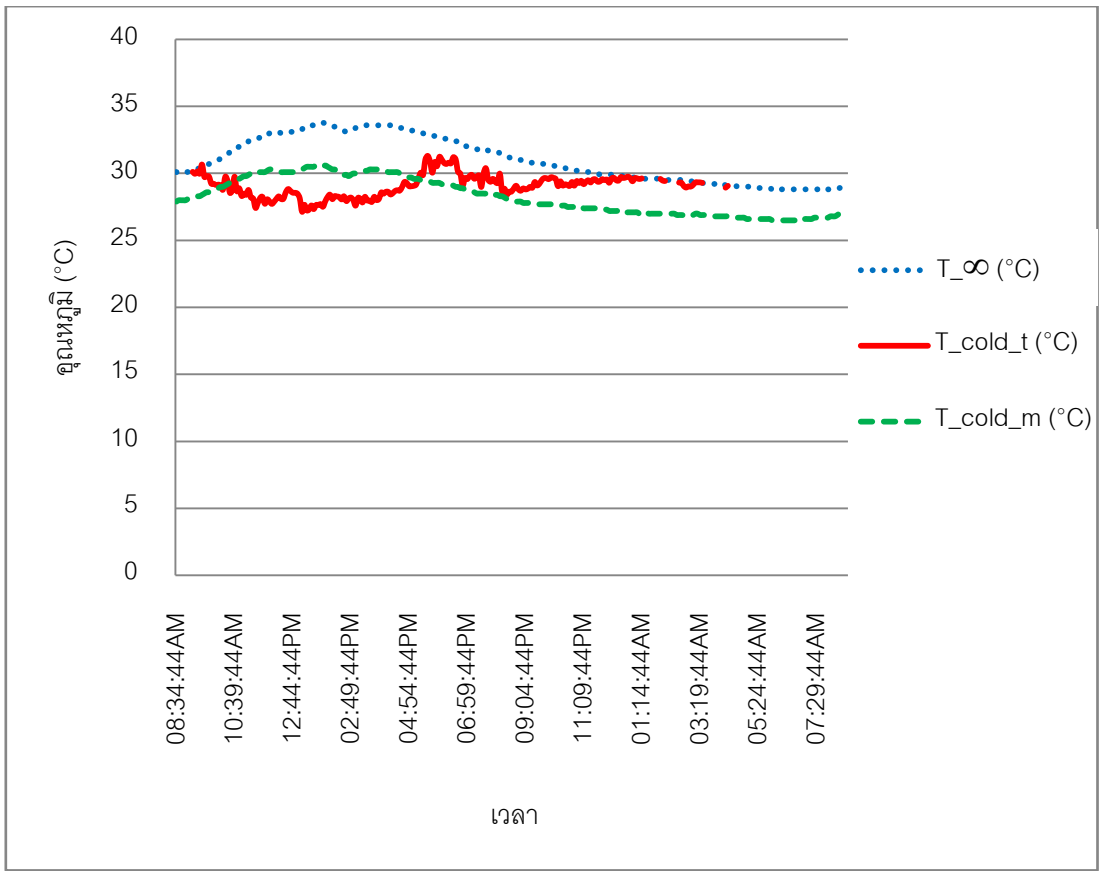
จากการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นเมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ด ทุก ๆ 5 นาที นานเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นับจากเวลา 8.30 น. ของวันที่ 12 ตุลาคม 2558 ถึงเวลา 8.30 น. ของวันที่ 13 ตุลาคม 2558 ซึ่งได้จัดให้ห้องเพาะเลี้ยงดังกล่าวอยู่ใต้ชายคาบ้านพักของผู้วิจัย เป็นพื้นที่เปิดโล่ง มีแดดส่องถึงเพียงเล็กน้อย อยู่ติดริมถนนของหมู่บ้านซึ่งอยู่ในตัวเมืองของจังหวัดตรัง มีรถยนต์จอดและผ่านไปบ้างตลอดช่วงกลางวัน แต่เงียบสงบในช่วงกลางคืน ไม่มี

การรบกวนของเด็กและสุนัข สภาพอากาศโดยรวมมีลักษณะครึ้มฝน มีแดดจัดบ้างเป็นบางช่วง มีฝนตกพอประมาณในช่วงเที่ยงวันและช่วงพลบค่ำของวันที่ 12 ตุลาคม และมีหมอกและน้ำค้างพอประมาณในช่วงเช้าของวันที่ 13 ตุลาคม แล้วเมื่อนำข้อมูล (ดังรายละเอียดตามตารางที่ 10 ในภาคผนวก ก) มาเขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ปรากฏผลดังภาพที่ 22 และภาพที่ 23 สามารถพิจารณาแยกเป็นประเด็นได้ดังต่อไปนี้

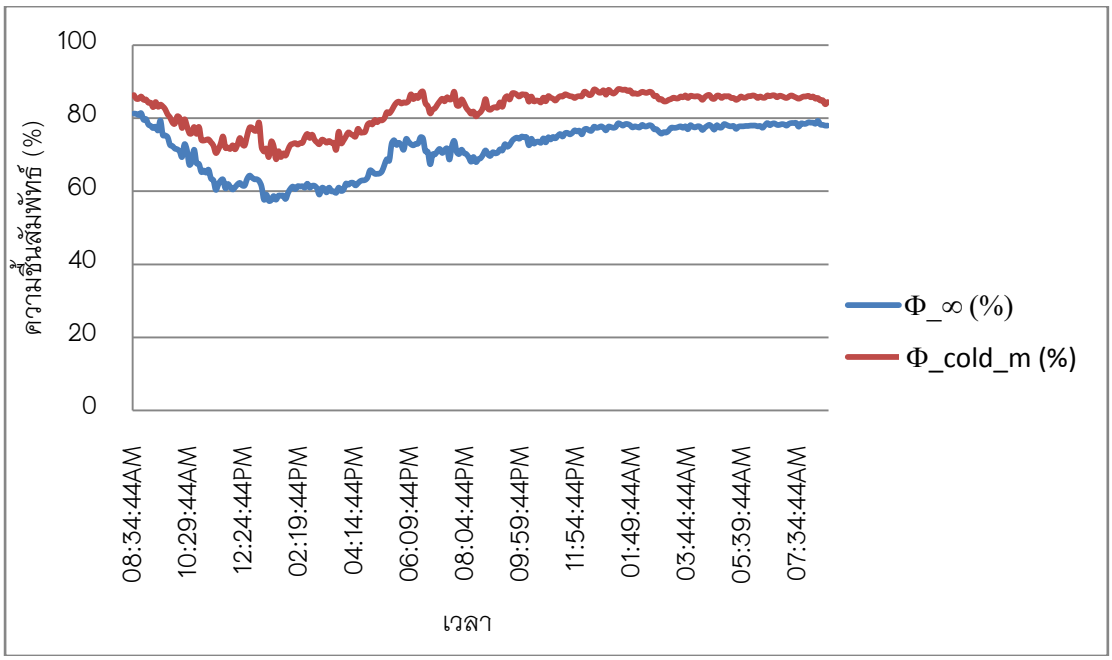
- จากภาพที่ 22 เมื่อสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานเทียบกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (T_∞) จะพบว่าค่าที่วัดได้ (T_cold_m) มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับ T_∞ และมีค่าน้อยกว่า T_∞ เสมอ ในขณะที่ค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีในขั้นตอนที่ 3.3.3 (T_cold_t) นั้นไม่สอดคล้องกับ T_∞ แม้ว่าค่า T_cold_m และ T_cold_t จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ก็ตาม อีกทั้งจะพบว่าในบางช่วงที่สิ่งแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์ ($\Phi$_∞) สูงเกิน 76% จะไม่สามารถคำนวณค่า T_cold_t ได้ ดังที่สังเกตได้ว่าเส้นกราฟมีการขาดหายไป

- จากภาพที่ 23 เมื่อสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ($\Phi$_cold_m) เทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ($\Phi$_∞) จะพบว่าทั้งสองค่ามีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน และ $\Phi$_cold_m มีค่ามากกว่า $\Phi$_∞ เสมอ

- ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นที่สร้างขึ้นสามารถรักษาอุณหภูมิของอากาศภายในได้ต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศในสิ่งแวดล้อม และรักษาความชื้นสัมพัทธ์ไว้ได้สูงกว่าในสิ่งแวดล้อมตลอดเวลา อีกทั้งยังสอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน คือ อุณหภูมิประมาณ 25 – 35 °C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 70 – 80 % และในช่วงเวลากลางคืนนั้น ความชื้นสัมพัทธ์ที่รักษาไว้ได้ยังสูงกว่า 80% อีกด้วย




ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากสิ่งแวดล้อม และภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา ทั้งที่วัดได้และจากการคำนวณโดยทฤษฎี เมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง




ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากสิ่งแวดล้อมและภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา เมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อนำค่า T_cold_m และ $\Phi_{cold_m}$ มาวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ ปรากฏผลดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง T_cold_m กับค่า T_∞ และ $\Phi_\infty$

| กลุ่มตัวแปรที่ศึกษาความสัมพันธ์กับ T_cold_m | ค่าสัมประสิทธิ์ | | t-value | t-prob |
|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $\beta_0$ | | |
| ค่าคงตัว | 9.800 | | 8.051 | 0.000 |
| T_∞ | 0.669 | 0.832 | 26.518 | 0.000 |
| $\Phi_\infty$ | -0.032 | -0.157 | -4.994 | 0.000 |
| F-value, F-prob | 3158.177 | 0.000 | | |
| R, R Square, R Square Adjusted | 0.978 | 0.957 | 0.956 | |
| Std, err of estimate | 0.287 | | | |

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบด้วยค่าสถิติ F-test ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง) พบว่าทั้ง T_∞ และ $\Phi$_∞ มีอิทธิพลต่อ T_cold_m (F-prob = 0.000) โดยที่ทั้งสองตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับ T_cold_m ในระดับค่อนข้างสูง (R = 0.987) และจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ T_cold_m ถึง 95.7% ทั้งนี้ สามารถสร้างรูปแบบของความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_cold_m = 9.800 + 0.669\ T_\infty - 0.032\ \Phi_\infty \quad (37)$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\Phi$_cold_m, T_∞ และ $\Phi$_∞

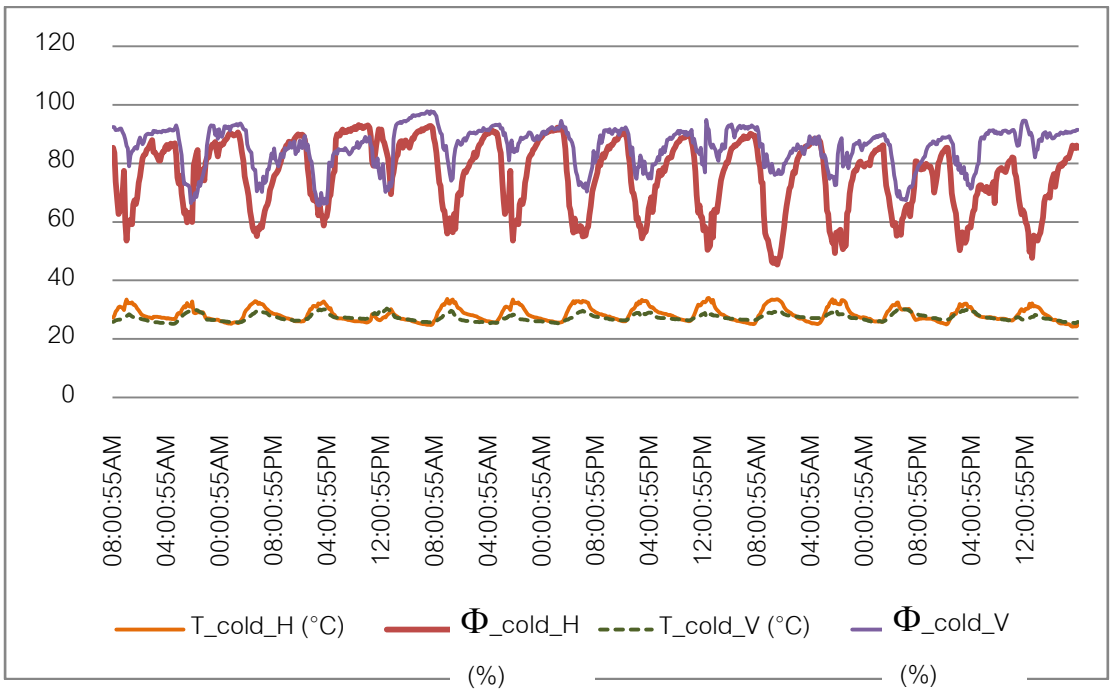
| กลุ่มตัวแปรที่ศึกษาความสัมพันธ์กับ $\Phi$_cold_m | ค่าสัมประสิทธิ์ | | t-value | t-prob |
|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $\beta_0$ | | |
| ค่าคงตัว | -12.969 | | -1.746 | 0.082 |
| T_∞ | 0.883 | 0.284 | 5.734 | 0.000 |
| $\Phi$_∞ | 0.942 | 1.199 | 24.188 | 0.000 |
| F-value, F-prob | 1178.943 | 0.000 | | |
| R, R Square, R Square Adjusted | 0.944 | 0.892 | 0.891 | |
| Std, err of estimate | 1.753 | | | |

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบด้วยค่าสถิติ F-test ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง) พบว่าทั้ง T_∞ และ $\Phi$_∞ มีอิทธิพลต่อ $\Phi$_cold_m (F-prob = 0.000) โดยที่ทั้งสองตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับ $\Phi$_cold_m ในระดับค่อนข้างสูง (R = 0.944) และจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ T_cold_m ถึง 89.2% ทั้งนี้ สามารถสร้างรูปแบบของความสัมพันธ์ได้ดังนี้

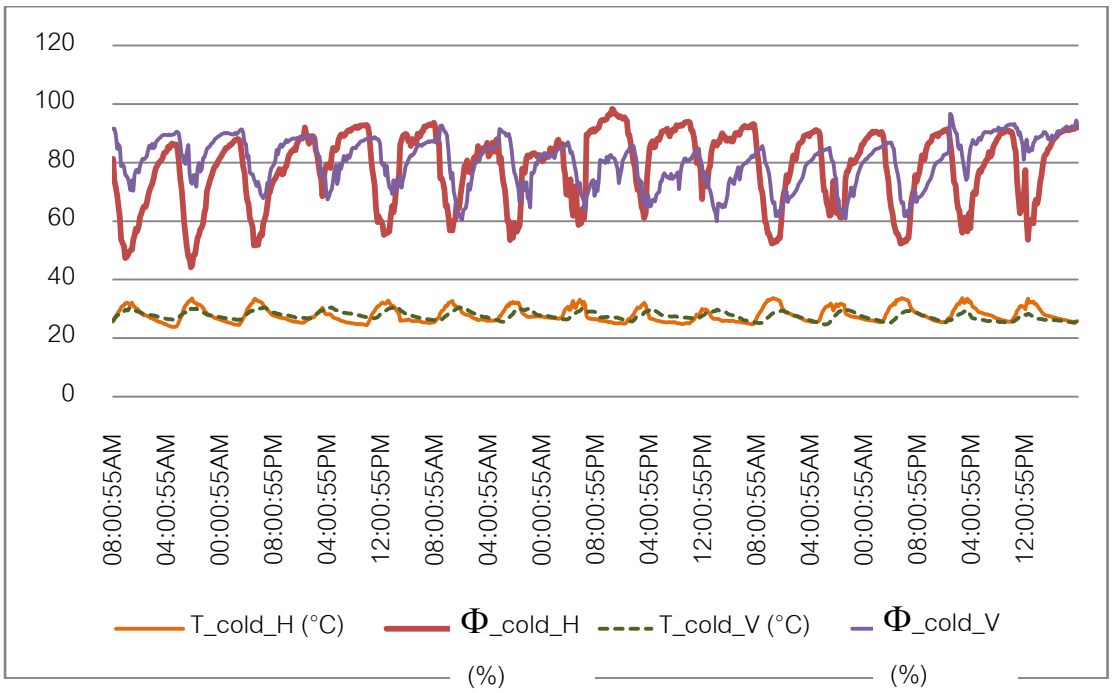
$$T_cold_m = -12.969 + 0.883*T_\infty + 0.942*\Phi_\infty \quad (38)$$

## 1.4 การวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยง และเปรียบเทียบมวลของเห็ดที่เก็บมาจากทั้งห้องเพาะเลี้ยงที่สร้างขึ้นทั้งสองแบบ

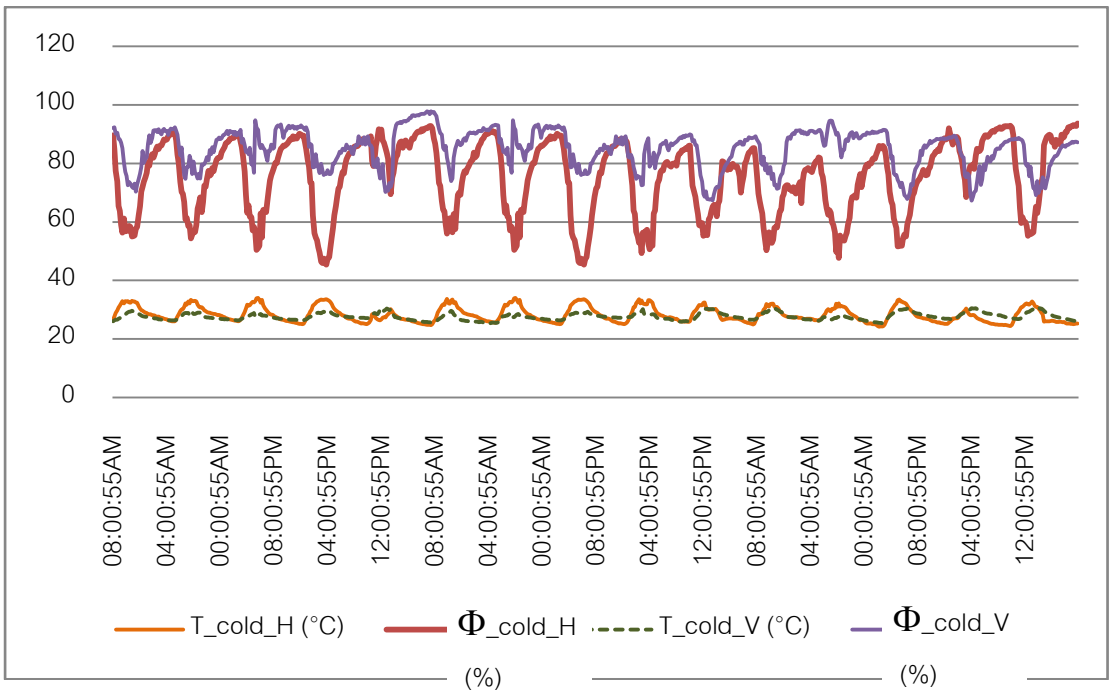
4.4.1 จากการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบเมื่อได้เพาะเลี้ยงเห็ดแล้ว ทุก ๆ 30 นาที นานเป็นระยะเวลา 60 วัน ปรากฏผลดังต่อไปนี้



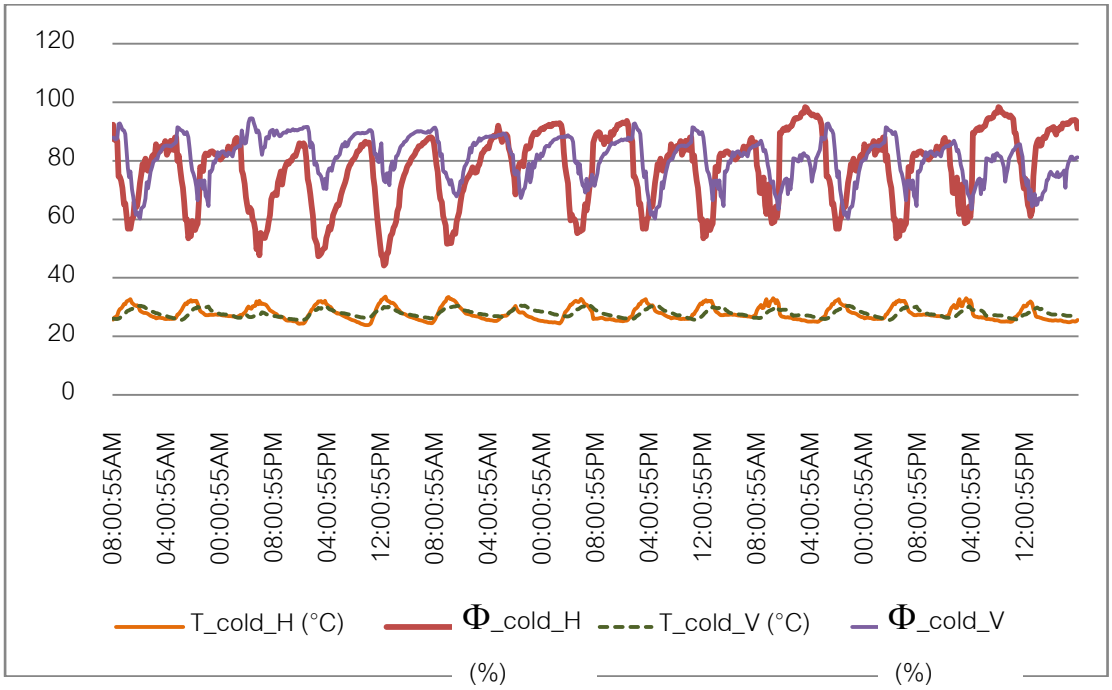

ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 1 – 15 ของการทดลอง




ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 16 – 30 ของการทดลอง




ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 31 – 45 ของการทดลอง




ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ และ $\Phi_{cold}$ ในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ในช่วงวันที่ 46 – 60 ของการทดลอง

จากข้อมูลดังกราฟในภาพที่ 24 – 27 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบเมื่อได้ดำเนินการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในช่วงเวลา 60 วัน (วันที่ 15 ตุลาคม ถึงวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ.2558) 23 สามารถพิจารณาแยกเป็นประเด็นได้ดังต่อไปนี้

- เมื่อใดที่ฝนไม่ตกนั้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นจะมีค่าสูงกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรใช้ตามปกติ แต่เมื่อใดที่ฝนตกจะตรงกันข้าม

- เมื่อพิจารณาให้ในช่วงเวลาหนึ่งวันมีช่วงที่อุณหภูมิของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงมีค่าสูง (กราฟมีลักษณะโค้งคว่ำ) และช่วงที่อุณหภูมิของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงมีค่าต่ำ (กราฟมีลักษณะโค้งหงาย) จะพบว่าในช่วงที่อุณหภูมิสูงของแต่ละวันนั้น อุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นจะมีค่าต่ำกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรใช้ตามปกติทุกวัน และในช่วงที่อุณหภูมิสูงของแต่ละวันนั้นจะตรงกันข้าม

- เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ พบว่าต่างก็สอดคล้องกับผลที่เกิดขึ้นดังกราฟในภาพที่ 22 และ 23 คือ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงจะได้อุณหภูมิมีค่าต่ำ หรือในทางกลับกัน เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำจะได้อุณหภูมิมีค่าสูง

- โดยภาพรวม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นนั้น มีความผันผวนน้อยกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรใช้ตามปกติ และมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน

4.4.2 จากการบันทึกค่ามวลของเห็ดนางฟ้าที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบในช่วงเวลา 60 วัน ปรากฏผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ ซึ่งทดลองพร้อมกันในช่วง 60 วัน

| มวลเห็ดนางฟ้าภูฐาน (g) | จากห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา | จากห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ |
|---|---|---|
| มวลรวมทั้ง 34 ถุง | 7,655 | 5,583 |
| มวลเฉลี่ยต่อถุง | 255.15 | 164.21 |
| มวลเฉลี่ยต่อรุ่น | 1,275.83 (5 รุ่น) | 1,116.60 (4 รุ่น) |

จากข้อมูลในตารางที่ 3 จะสังเกตว่าในช่วงเวลา 60 วัน ที่ทำการทดลองนั้น ห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษามีเห็ดนางฟ้าภูฐานเจริญเติบโตได้ 5 รุ่น ในขณะที่ห้องเพาะเลี้ยงแบบปกตินั้นมีเห็ดนางฟ้าภูฐานเจิญเติบโตได้ 4 รุ่น ซึ่งมีผลทำให้ทั้งมวลรวม มวลเฉลี่ยต่อถุง และมวลเฉลี่ยต่อรุ่น ของเห็ดจากห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นมีค่ามากกว่าเห็ดจากห้องเพาะเลี้ยงที่เกษตรกรนิยมใช้

# บทที่ 5
# อภิปรายและสรุปผล

## 5.1 อภิปรายผล

ในส่วนของการศึกษาพารามิเตอร์กายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นนั้น จะได้ข้อมูลดังหัวข้อ 4.2 ในบทที่ 4 ซึ่งได้ผลว่าทฤษฎีและตัวแปรควบคุมที่กำหนดทั้งหมดนั้น ให้ผลที่คาดการณ์ได้ว่าจะสามารถนำไปใช้ในการสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น แต่ก็มีข้อสังเกตที่น่าสนใจ ได้แก่

ผลจากการแปรค่า $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ ในหัวข้อที่ 4.2.3.1 ซึ่งจะพบว่าทั้ง $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ ต่างก็เป็นปัจจัยทางกายภาพที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาอย่างเด่นชัด กล่าวคือ $T_{cold}$ มีแนวโน้มที่แปรผันตามทั้ง $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$ ซึ่งถ้าหาก $T_\infty$ มีค่าสูงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลง $T_{cold}$ มากด้วย แต่หาก $T_\infty$ มีค่าต่ำ ในขณะที่ $\Phi_\infty$ มีค่าสูงนั้นกลับมีผลทำให้ $\eta_{th}$ มีค่าลดลงมากจนติดลบซึ่งเป็นไปไม่ได้ทางทฤษฎี จึงอธิบายได้ว่าทฤษฎีแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นนี้ไม่สามารถใช้อธิบายการทำงานของห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาได้เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำและความชื้นสูงเกินไป แต่อย่างไรก็ตาม ค่า $T_{cold}$ และ $\eta_{th}$ ที่ได้มานั้นก็ถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน

ผลจากการแปรค่า $Q_{load}$, $k_{eff}$ และ $k_{con}$ นั้นจะพบว่าปัจจัยทั้งสามนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาไม่มาก และค่า $T_{cold}$ และ $\eta_{th}$ ที่ได้มานั้นก็ถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน

เมื่อได้ออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ทดลองวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเพาะเลี้ยงนั้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยที่ยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน พบว่าได้ผลที่สอดคล้องกับสมมติฐาน คือได้ค่า $T_{cold}$ และ $\eta_{th}$ ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน ดังข้อมูลในหัวข้อ 4.3 ของบทที่ 4 แต่ก็มีข้อสังเกตที่น่าสนใจอยู่หลายประการ ได้แก่

- ในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงเกิน 80% ซึ่งเป็นค่าที่ทฤษฎีทำนายได้ไม่ดีนั้น จะวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงได้เกิน 90% ซึ่งเกินไปจากค่าที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน ผู้วิจัยเห็นว่าการศึกษาห้องเพาะเลี้ยงนี้ไม่ควรอยู่สิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงเกินไป และความชื้นที่สูงเช่นนี้

จะมีผลต่ออุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงซึ่งจะทำให้ไม่สอดคล้องกับทฤษฎี ทั้งนี้ได้ปรากฏหลักฐานจากเส้นกราฟที่เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี จะเห็นว่ามีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้ และเมื่อพิจารณาร่วมกับการที่ $T_{cold}$ ได้รับอิทธิพลอย่างเด่นชัดจาก $T_{\infty}$ และ $\Phi_{\infty}$ จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ จึงพบว่า $T_{\infty}$ และ $\Phi_{\infty}$ มีอิทธิพลต่อ $T_{cold}$ ที่วัดได้ในระดับค่อนข้างสูง (R = 0.987) และเมื่อพิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดความสัมพันธ์ดังกล่าว ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นเพราะห้องเพาะเลี้ยงมีขนาดใหญ่กว่าหม้อดินเก็บความเย็นที่ A.W. Date ได้ศึกษา อีกทั้งสัดส่วนของขนาดผนังที่ถ่ายเทความร้อนกับปริมาณอาหารที่หายใจและคายความร้อนก็แตกต่างกัน และส่วนที่ผู้วิจัยเห็นว่าสำคัญอย่างยิ่งคือ ห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาไม่ได้ปิดส่วนบนและล่างเป็นฉนวน 100% ดังเช่นในทฤษฎี ซึ่งมีผลทำให้ $T_{\infty}$ และ $\Phi_{\infty}$ ถ่ายเทสู่ภายในห้องเพาะเลี้ยงได้มากกว่าการผ่านผนังเพียงอย่างเดียว

ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบดังข้อมูลในหัวข้อ 4.4.1 ของบทที่ 4 พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐาน แต่จะสังเกตว่ามีบางช่วงที่ตรงข้ามบ้าง ทั้งนี้ช่วงเวลานั้นมีฝนตกซึ่งจะส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูง ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้นได้ไม่มาก และอีกประการหนึ่งที่พบคือ อุณหภูมิของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษานั้นส่วนใหญ่จะต่ำกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐาน แต่จะสังเกตพบว่าช่วงที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในแต่ละวันนั้นจะตรงข้าม ซึ่งเป็นช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าเป็นผลมาจากการที่ค่าประสิทธิภาพอุณหพลวัติของห้องเพาะเลี้ยงจะต่ำในช่วงที่สิ่งแวดล้อมมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ทำให้การลดอุณหภูมิภายในทำได้ไม่ดี แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อได้พิจารณาควบคู่ไปกับข้อมูลการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้า จะพบว่าอุณหภูมิภายในของห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบนั้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน แต่อุณหภูมิภายในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติมีการผันผวนมากกว่า เช่นเดียวกันกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยง แต่ในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำสุดในแต่ละวันนั้นในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติจะลดลงจนต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษานั้นมีความผันผวนน้อยกว่าอีกด้วย

และส่วนสุดท้าย การเปรียบเทียบมวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงทั้งสองแบบ พบว่าข้อมูลดังในหัวข้อ 4.4.2 ของบทที่ 4 นั้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.4.1 กล่าวคือ ห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาให้เห็ดนางฟ้าภูฐานมากกว่าห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

1) เห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษาออกดอกบ่อยกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ (5 รุ่น : 4 รุ่น) ในช่วงเวลา 60 วัน ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นผลมาจากการมีความชื้นสูงและอุณหภูมิต่ำเพียงพอต่อการงอกของดอกเห็ด

2) ได้เห็ดนางฟ้าภูฐานจากห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษามีมวลเฉลี่ยต่อรุ่น และมวลเฉลี่ยต่อถุงมากกว่าในห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นผลมาจากความผันผวนของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายใน ซึ่งในห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษานั้นจะมีความผันผวนน้อยกว่าตลอดระยะเวลา 60 วัน ที่ทดลองและเก็บข้อมูล

## 5.2 **สรุปผลการวิจัย**

1. จากการศึกษาทฤษฎีและการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง สามารถนำมาออกแบบและสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานด้วยวงบ่อซีเมนต์ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานได้

2. จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานที่สร้างขึ้น พบว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีของแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น และค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน มีความสอดคล้องกัน

3. การเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นทำให้ได้มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานมากการเพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้ ในช่วงเวลาที่เท่ากัน และมีความสะดวกในเรื่องการรดน้ำ เพราะไม่ต้องรดน้ำลงที่ถุงเชื้อเห็ดโดยตรงซึ่งเสี่ยงต่อการเน่าเสียของเชื้อเห็ด และรดน้ำเพียงวันละ 1 ครั้ง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. สถานที่ทำวิจัยมีผลอย่างยิ่งต่อผลวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยทำที่จังหวัดตรัง การเก็บข้อมูลเป็นช่วงฤดูฝน อากาศมีความชื้นสูง มีส่วนที่ทำให้ผลวิจัยไม่สมบูรณ์ หากมีการนำไปศึกษาจึงควรเลือกสถานที่ให้เหมาะสม

2. โดยปกติ เกษตรกรจะรดน้ำเห็ดนางฟ้าภูฐานวันละ 3-4 ครั้ง เพื่อรักษาความชื้นในห้องเพาะเลี้ยง แต่ผู้วิจัยรดน้ำทรายของห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นวันละ 1 ครั้ง และรดน้ำเห็ดห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้เพียงวันละ 2 ครั้ง เพื่อมิให้เกิดความแตกต่างของปริมาณน้ำที่ให้ทั้งสองห้องมากเกินไป กับทั้งมีข้อจำกัดให้เรื่องของเวลาซึ่งตอนกลางวันต้องไปทำงานไกลจากสถานที่ทดลองมาก หากมีการนำไปศึกษา อาจต้องพิจารณาถึงปริมาณความชื้นในสิ่งแวดล้อมและปริมาณน้ำที่รดให้แก่เห็ด รวมไปถึงเวลาและความสม่ำเสมอในการดูแลอีกด้วย

3. ช่วงเวลาในการเก็บเห็ดจากถุงเชื้อของผู้วิจัยจะดูตามความเหมาะสมของขนาดดอกเห็ด มิได้ยึดเวลาเดียวกันทุกวัน และในบางวันก็เก็บช้าไปบ้างด้วยข้อจำกัดของเวลาเช่นเดียวกับข้อเสนอแนะที่ 2 ดังนั้น หากมีการนำไปศึกษาเพิ่มเติม ควรกำหนดเวลาในการทดลองให้เหมาะสม

# บรรณานุกรม


จรินทร์ บัวชม. (2539). *การเพาะเห็ดนางฟ้าโดยใช้วัสดุเพาะฟางหมักผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาชีววิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ชมรมนักเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย. (2542). *ฟาร์มเพาะเห็ด*. กรุงเทพฯ: เกษตรการพิมพ์.

ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ. (2525). *การเพาะเห็ดและเห็ดบางชนิดในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. เอกสารการสอน.

บรรณ บูรณะชนบท. (2541). *การเพาะเห็ดนางรม-นางฟ้า* (พิมพ์ครั้งที่ 5). นนทบุรี: ฐานเกษตรกรรม.

บุญส่ง วงศ์เกรียงไกร. (2543). *เห็ดนางฟ้า* (พิมพ์ครั้งที่ 3). นนทบุรี: สำนักพิมพ์เกษตรปุ๊ค.

มนตรี พิรุณเกษตร. (2548). *การถ่ายเทความร้อน* (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.

มนตรี พิรุณเกษตร. (2548). *อุณหพลศาสตร์ 1* (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุนพับลิชชิ่ง.

มะลิ หุ่นสม. (2551). *ปรากฏการณ์ถ่ายโอนโมเมนตัม ความร้อน และมวลขั้นพื้นฐาน*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประสาน ยิ้มอ่อน. (2549). *การเพาะเห็ด*. กรุงเทพฯ: คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์. เอกสารการสอน.

สุนันท์ ศรัณยนิตย์. (2545). *การถ่ายเทความร้อน*. กรุงเทพฯ: ส.ส.ท.

สำนักข่าว NNN News. (2555). *เพาะเห็ดในโอ่งลงทุน 200 บาท* [วีดิทัศน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.youtube.com/watch?v=5q9iqGe2ZEM

สำนักข่าว TT News. (2554). *เห็ดโอ่ง พิษณุโลกบ้านเรา* [วีดิทัศน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.youtube.com/watch?v=V2gOuINjtpw

Breslyn Wayne. (2007). Clay Pot Refrigerators. *The Science Teacher*: *Tips and Techniques for Creative Teaching*, *748*, 74-75.

Date, A.W. (2012). Heat and mass transfer analysis of a clay-pot refrigerator. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 55,* 3977–3983.

Eckert & Drake. (1974). *Heat and Mass Transfer*. New Delhi: TATA McGraw-Hill.

Felix Omondi. (2014, 6 February). *Mohammed Bah Abbah – The Inventor of The Zeer, A Desert Refrigerator that Does Not Require Electricity*. Retrieved from http://innov8tiv.com/mohammed-bah-abbah-inventor-zeer-desert-refrigerator-require-electricity/

Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, & Adrienne S. Lavine. (2013). *Principle of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte.

Johan Löfström, Lonny Grafman, Chriswaterguy's bot, Chris Watkins, & Ayon Shahed. (2011, 30 December). *Zeer pot refrigerator*. Retrieved from http://www.appropedia.org/Zeer_pot_refrigerator

Office of Research, Development, and Technology and Office of Infrastructure. (2016, 8 January). *Portland Cement Concrete Pavements Research: Portland Cement Concrete Pavements Research*. Retrieved from http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/thermal.cfm

Patrick@BRINQ. (2005, 1 August). *Keeping it Cool - Clay Pot Refrigeration*. Retrieved from http://www.brinq.com/workshop/archives/2005/01/08/keeping-it-cool-clay-pot-refrigeration

Peter Rinker. (2014, 17 June). *The Clay Pot Cooler – An Appropriate Cooling Technology*. Retrieved from https://movement-verein.org/downloads/Movement_Clay-pot-cooler_english.pdf

Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, & David P. DeWitt. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). New York: John Wiley & Sons.

The Permaculture Research Institute & Filed Undwe Processing & Food Preservation, Community Projects. (2008, 11 August). *A Refrigerator that Runs without Electricity*. Retrieved from http://permaculturenews.org/2008/08/11/a-refrigerator-that-runs-without-electricity/

Wagner, W. & Pruss, A. (1993). International equations for the saturation properties of ordinary water substance. revised according to the international temperature scale of 1990. *J. Phy. Chem. Ref. Data*, *22*(3), 783–787.

*Zeer Pot Fridge*. (2010, 24 December). Retrieved from http://practicalaction.org/zeer-pot-fridge

# ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

ตารางข้อมูลที่ใช้ในการเขียนกราฟแสดงผลการวิจัย

ตารางภาคผนวก ก-1 ผลเนื่องจากการแปรค่า $\Phi_\infty$ และ $T_\infty$

| $\Phi_\infty$ (%) | $T_\infty$ = 20 °C | | $T_\infty$ = 25 °C | | $T_\infty$ = 30 °C | | $T_\infty$ = 35 °C | | $T_\infty$ = 40 °C | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{cold}$ (°C) | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ (°C) | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ (°C) | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ (°C) | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ (°C) | $\eta_{th}$ |
| 24 | 12.6460 | 0.3471 | 14.5489 | 0.4754 | 16.1481 | 0.6078 | 17.4293 | 0.7441 | 18.3769 | 0.8845 |
| 30 | 13.6567 | 0.3503 | 15.8461 | 0.4871 | 17.7855 | 0.6268 | 19.4576 | 0.7696 | 20.8433 | 0.9160 |
| 36 | 14.6578 | 0.3440 | 17.1253 | 0.4885 | 19.3920 | 0.6344 | 21.4363 | 0.7827 | 23.2343 | 0.9340 |
| 42 | 15.6503 | 0.3268 | 18.3874 | 0.4786 | 20.9689 | 0.6301 | 23.3673 | 0.7829 | 25.5535 | 0.9385 |
| 48 | 16.6358 | 0.2964 | 19.6339 | 0.4553 | 22.5176 | 0.6119 | 25.2529 | 0.7689 | 27.8046 | 0.9284 |
| 54 | 17.6164 | 0.2484 | 20.8668 | 0.4148 | 24.0405 | 0.5763 | 27.0958 | 0.7371 | 29.9916 | 0.9007 |
| 60 | 18.5954 | 0.1754 | 22.0892 | 0.3501 | 25.5407 | 0.5167 | 28.8998 | 0.6816 | 32.1197 | 0.8496 |
| 66 | 19.5779 | 0.0644 | 23.3059 | 0.2490 | 27.0232 | 0.4215 | 30.6705 | 0.5911 | 34.1955 | 0.7646 |
| 72 | | | 24.5255 | 0.0877 | 28.4966 | 0.2678 | 32.4170 | 0.4435 | 36.2287 | 0.6247 |
| 78 | | | | | 29.9771 | 0.0054 | 34.1558 | 0.1907 | 38.2366 | 0.3842 |

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลเนื่องจากการแปรค่า $Q_{load}$ ที่ค่า $T_\infty(ref) = 30$ °C

| $Q_{Load}$ | $\Phi_\infty = 33\%$ | | $\Phi_\infty = 41\%$ | | $\Phi_\infty = 49\%$ | | $\Phi_\infty = 57\%$ | | $\Phi_\infty = 65\%$ | | $\Phi_\infty = 73\%$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (W) | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ |
| 7 | 17.7046 | 0.6813 | 19.7894 | 0.6942 | 21.8184 | 0.6876 | 23.7946 | 0.6556 | 25.7235 | 0.5847 | 27.6155 | 0.4429 |
| 8 | 18.0006 | 0.6649 | 20.0956 | 0.6734 | 22.1367 | 0.6608 | 24.1275 | 0.6204 | 26.0747 | 0.5367 | 27.9911 | 0.3732 |
| 9 | 18.2965 | 0.6485 | 20.4018 | 0.6525 | 22.4549 | 0.6341 | 24.4603 | 0.5852 | 26.4259 | 0.4886 | 28.3667 | 0.3034 |
| 10 (ref) | 18.5925 | 0.6321 | 20.7080 | 0.6317 | 22.7732 | 0.6074 | 24.7932 | 0.5501 | 26.7771 | 0.4406 | 28.7423 | 0.2336 |
| 11 | 18.8885 | 0.6157 | 21.0142 | 0.6109 | 23.0914 | 0.5806 | 25.1260 | 0.5149 | 27.1283 | 0.3926 | 29.1179 | 0.1639 |
| 12 | 19.1845 | 0.5993 | 21.3204 | 0.5901 | 23.4097 | 0.5539 | 25.4589 | 0.4798 | 27.4795 | 0.3446 | 29.4934 | 0.0941 |
| 13 | 19.4804 | 0.5829 | 21.6266 | 0.5693 | 23.7279 | 0.5271 | 25.7917 | 0.4446 | 27.8306 | 0.2966 | 29.8690 | 0.0243 |

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลเนื่องจากการแปรค่า $k_{eff}$ (W/m-K) ที่ค่า $T_{\infty}(ref) = 30\,^{\circ}\mathrm{C}$ สำหรับ $Q_{load} = 10$ W

| $k_{eff}$ | $\Phi_{\infty} = 34\%$ | | $\Phi_{\infty} = 42\%$ | | $\Phi_{\infty} = 50\%$ | | $\Phi_{\infty} = 58\%$ | | $\Phi_{\infty} = 66\%$ | | $\Phi_{\infty} = 74\%$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (W/m-K) | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ |
| 1.0 | | | | | | | 21.2738 | 0.9503 | 24.0858 | 0.8375 | 26.8394 | 0.6131 |
| 1.5 | 16.6951 | 0.7562 | 19.1192 | 0.7592 | 21.481 | 0.7359 | 23.7865 | 0.6766 | 26.0441 | 0.5602 | 28.2719 | 0.3352 |
| 2.0 (ref) | 18.8598 | 0.6332 | 20.9689 | 0.6301 | 23.028 | 0.6023 | 25.0429 | 0.5398 | 27.0232 | 0.4215 | 28.9882 | 0.1963 |
| 2.5 | 20.1587 | 0.5593 | 22.0787 | 0.5527 | 23.956 | 0.5221 | 25.7967 | 0.4577 | 27.6107 | 0.3383 | 29.4179 | 0.1129 |
| 3.0 | 21.0246 | 0.5101 | 22.8186 | 0.5011 | 24.575 | 0.4686 | 26.2993 | 0.4030 | 28.0024 | 0.2829 | 29.7045 | 0.0573 |
| 3.5 | 21.6430 | 0.4750 | 23.3470 | 0.4642 | 25.017 | 0.4305 | 26.6582 | 0.3639 | 28.2821 | 0.2433 | 29.9091 | 0.0176 |

ตารางภาคผนวก ก-4 ผลเนื่องจากการแปรค่า $k_{con}$ (W/m-K) ที่ค่า $T_{\infty}(ref) = 30\,^{\circ}\mathrm{C}$ สำหรับ $Q_{load} = 10$ W

| $k_{con}$ | $\Phi_{\infty} = 37\%$ | | $\Phi_{\infty} = 45\%$ | | $\Phi_{\infty} = 53\%$ | | $\Phi_{\infty} = 61\%$ | | $\Phi_{\infty} = 69\%$ | | $\Phi_{\infty} = 77\%$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (W/m-K) | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ | $T_{cold}$ | $\eta_{th}$ |
| 0.73 | 17.9749 | 0.7378 | 20.3679 | 0.7270 | 22.7009 | 0.6859 | 24.9802 | 0.6005 | 27.2173 | 0.4400 | 29.4368 | 0.1256 |
| 1.23 | 19.1577 | 0.6652 | 21.3375 | 0.6538 | 23.4657 | 0.6140 | 25.5489 | 0.5325 | 27.5992 | 0.3796 | 29.6421 | 0.0798 |
| 1.73 (ref) | 19.6568 | 0.6346 | 21.7466 | 0.6229 | 23.7884 | 0.5837 | 25.7888 | 0.5038 | 27.7603 | 0.3541 | 29.7288 | 0.0605 |
| 2.23 | 19.9321 | 0.6177 | 21.9723 | 0.6059 | 23.9664 | 0.5670 | 25.9212 | 0.4879 | 27.8492 | 0.3401 | 29.7766 | 0.0498 |
| 2.73 | 20.1066 | 0.6070 | 22.1153 | 0.5951 | 24.0792 | 0.5564 | 26.0051 | 0.4779 | 27.9055 | 0.3312 | 29.8069 | 0.0431 |
| 3.23 | 20.2270 | 0.5996 | 22.2140 | 0.5877 | 24.1570 | 0.5490 | 26.0630 | 0.4710 | 27.9444 | 0.3250 | 29.8278 | 0.0384 |

ตารางภาคผนวก ก-5 การเปลี่ยนแปลงค่า $T_{\infty}$, $T_{cold}$ จากทฤษฎีและที่วัดได้ $\Phi_{\infty}$ และ $\Phi_{cold}$ ที่วัดได้ เมื่อยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

| เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) | เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ทฤษฎี | การวัด | | | | | ทฤษฎี | การวัด | | |
| 08:34 | 30.1 | | 27.9 | 81.3 | 86.3 | 10:34 | 31.6 | 28.7 | 29.4 | 68.1 | 75.9 |
| 08:39 | 30 | | 28 | 81.2 | 85.3 | 10:39 | 31.8 | 29.8 | 29.5 | 71.4 | 77.6 |
| 08:44 | 30.1 | | 28 | 80.9 | 85.3 | 10:44 | 31.9 | 28.7 | 29.5 | 67.7 | 75.7 |
| 08:49 | 30.1 | | 28 | 81.4 | 85.9 | 10:49 | 32 | 28.9 | 29.6 | 67.5 | 77.6 |
| 08:54 | 30.1 | | 28 | 79.6 | 85 | 10:54 | 32 | 28.3 | 29.7 | 65.3 | 74.1 |
| 08:59 | 30.1 | | 28.1 | 79.8 | 85.1 | 10:59 | 32.1 | 28.5 | 29.8 | 65.7 | 73.9 |
| 09:04 | 30.1 | | 28.1 | 78.3 | 84.2 | 11:04 | 32.2 | 28.4 | 29.8 | 65.1 | 74.1 |
| 09:09 | 30.2 | 30.1 | 28.2 | 77.9 | 84.2 | 11:09 | 32.4 | 28.8 | 29.9 | 65.9 | 74.2 |
| 09:14 | 30.2 | 30.0 | 28.2 | 77.3 | 83 | 11:14 | 32.5 | 28.2 | 30 | 63.5 | 73.4 |
| 09:19 | 30.3 | 30.2 | 28.3 | 77.7 | 84.4 | 11:19 | 32.6 | 28.1 | 30.1 | 63 | 72.5 |
| 09:24 | 30.4 | 30.0 | 28.3 | 76.7 | 83.1 | 11:24 | 32.6 | 27.4 | 30.2 | 60.4 | 70.5 |
| 09:29 | 30.4 | 30.7 | 28.4 | 79.4 | 83.7 | 11:29 | 32.6 | 27.8 | 30.1 | 61.8 | 71.4 |
| 09:34 | 30.5 | 29.7 | 28.5 | 75.4 | 83.2 | 11:34 | 32.7 | 28.2 | 30.1 | 62.9 | 73 |
| 09:39 | 30.6 | 29.8 | 28.6 | 75.3 | 82.4 | 11:39 | 32.7 | 28.2 | 30.1 | 63.2 | 75 |
| 09:44 | 30.7 | 29.8 | 28.6 | 74.8 | 81 | 11:44 | 32.9 | 27.7 | 30.1 | 60.8 | 71.9 |
| 09:49 | 30.7 | 29.2 | 28.7 | 72.7 | 80.2 | 11:49 | 32.9 | 28.1 | 30.2 | 62 | 72 |
| 09:54 | 30.8 | 29.2 | 28.7 | 72.4 | 78.8 | 11:54 | 33 | 27.9 | 30.3 | 61.2 | 71.6 |
| 09:59 | 30.9 | 29.1 | 28.8 | 71.7 | 78.5 | 11:59 | 33 | 27.7 | 30.3 | 60.5 | 72.6 |
| 10:04 | 31 | 29.2 | 28.9 | 71.5 | 80.5 | 12:04 | 33 | 27.9 | 30.3 | 61.1 | 71.5 |
| 10:09 | 31.1 | 29.1 | 29 | 70.9 | 80 | 12:09 | 33 | 28.1 | 30.2 | 61.9 | 72.8 |
| 10:14 | 31.2 | 28.8 | 29 | 69.4 | 77.3 | 12:14 | 33.1 | 28.3 | 30.2 | 62.3 | 74.6 |
| 10:19 | 31.3 | 29.8 | 29.1 | 72.9 | 79.7 | 12:19 | 33 | 28.1 | 30.1 | 61.6 | 72.9 |
| 10:24 | 31.4 | 29.4 | 29.2 | 71.3 | 77.9 | 12:24 | 33 | 28.1 | 30.1 | 61.6 | 72.6 |
| 10:29 | 31.6 | 28.5 | 29.3 | 67.3 | 75.9 | 12:29 | 33 | 28.6 | 30.1 | 63.4 | 75.2 |

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

| เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) | เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ทฤษฎี | การวัด | | | | | ทฤษฎี | การวัด | | |
| 12:34 | 33 | 28.8 | 30.1 | 64.3 | 77.4 | 02:34 | 33.2 | 28.3 | 29.9 | 62.1 | 75.7 |
| 12:39 | 33.1 | 28.7 | 30.1 | 63.8 | 77.4 | 02:39 | 33.1 | 27.9 | 29.9 | 61 | 74.6 |
| 12:44 | 33.1 | 28.6 | 30.1 | 63.3 | 76.6 | 02:44 | 33.2 | 28.1 | 29.8 | 61.5 | 75.5 |
| 12:49 | 33.1 | 28.6 | 30.1 | 63.3 | 76.7 | 02:49 | 33.3 | 28.2 | 29.9 | 61.5 | 74.1 |
| 12:54 | 33.2 | 28.5 | 30.2 | 62.8 | 78.7 | 02:54 | 33.3 | 28.0 | 30 | 60.8 | 73.4 |
| 12:59 | 33.3 | 28.1 | 30.2 | 61.3 | 72.1 | 02:59 | 33.4 | 27.6 | 30 | 59.1 | 72.9 |
| 01:04 | 33.3 | 27.1 | 30.3 | 57.7 | 70.9 | 03:04 | 33.5 | 28.2 | 30.1 | 60.9 | 74.1 |
| 01:09 | 33.5 | 27.7 | 30.4 | 59.1 | 71.7 | 03:09 | 33.5 | 28.1 | 30.1 | 60.7 | 73.9 |
| 01:14 | 33.6 | 27.2 | 30.5 | 57.4 | 69.4 | 03:14 | 33.5 | 27.8 | 30.1 | 59.7 | 73.3 |
| 01:19 | 33.6 | 27.3 | 30.5 | 57.6 | 73.6 | 03:19 | 33.6 | 28.3 | 30.2 | 61 | 73.8 |
| 01:24 | 33.6 | 27.6 | 30.5 | 58.7 | 72.4 | 03:24 | 33.6 | 28.0 | 30.2 | 60 | 73.3 |
| 01:29 | 33.6 | 27.3 | 30.5 | 57.7 | 68.8 | 03:29 | 33.6 | 28.0 | 30.3 | 60 | 73.2 |
| 01:34 | 33.6 | 27.6 | 30.6 | 58.8 | 71 | 03:34 | 33.6 | 27.9 | 30.3 | 59.6 | 71.4 |
| 01:39 | 33.6 | 27.6 | 30.6 | 58.8 | 69.4 | 03:39 | 33.6 | 28.3 | 30.3 | 61 | 76.3 |
| 01:44 | 33.7 | 27.7 | 30.6 | 58.8 | 70.4 | 03:44 | 33.6 | 28.0 | 30.3 | 60.1 | 73.2 |
| 01:49 | 33.8 | 27.5 | 30.5 | 57.9 | 69.8 | 03:49 | 33.6 | 28.1 | 30.3 | 60.4 | 73.9 |
| 01:54 | 33.7 | 27.9 | 30.6 | 59.6 | 71.4 | 03:54 | 33.6 | 28.6 | 30.2 | 62.1 | 75 |
| 01:59 | 33.6 | 28.2 | 30.5 | 60.7 | 72.7 | 03:59 | 33.6 | 28.5 | 30.2 | 61.8 | 76.1 |
| 02:04 | 33.6 | 28.4 | 30.4 | 61.3 | 73 | 04:04 | 33.6 | 28.6 | 30.2 | 62.3 | 75.7 |
| 02:09 | 33.5 | 28.1 | 30.3 | 60.6 | 73.2 | 04:09 | 33.6 | 28.6 | 30.1 | 62.3 | 75.3 |
| 02:14 | 33.5 | 28.3 | 30.3 | 61.4 | 72.8 | 04:14 | 33.6 | 28.4 | 30.1 | 61.6 | 75 |
| 02:19 | 33.5 | 28.3 | 30.2 | 61.3 | 73.2 | 04:19 | 33.5 | 28.5 | 30.1 | 62.2 | 77.1 |
| 02:24 | 33.4 | 28.2 | 30.1 | 61.4 | 73.3 | 04:24 | 33.5 | 28.7 | 30.1 | 62.8 | 76.1 |
| 02:29 | 33.3 | 28.1 | 30.1 | 61 | 74.8 | 04:29 | 33.5 | 28.7 | 30.1 | 63 | 76.1 |

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

| เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) | เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ทฤษฎี | การวัด | | | | | ทฤษฎี | การวัด | | |
| 04:34 | 33.4 | 28.7 | 30 | 63.1 | 76.3 | 06:34 | 32.4 | 31.1 | 29 | 74.5 | 87.2 |
| 04:39 | 33.4 | 29.0 | 29.9 | 63.8 | 78.2 | 06:39 | 32.4 | 30.1 | 29 | 71 | 84.1 |
| 04:44 | 33.3 | 29.4 | 29.9 | 65.7 | 78.7 | 06:44 | 32.3 | 30.0 | 28.9 | 70.8 | 83.3 |
| 04:49 | 33.3 | 29.3 | 29.8 | 65.4 | 78.3 | 06:49 | 32.3 | 29.1 | 28.9 | 67.4 | 81.3 |
| 04:54 | 33.2 | 29.0 | 29.7 | 64.8 | 79.5 | 06:54 | 32.1 | 29.7 | 28.8 | 70.1 | 82.3 |
| 04:59 | 33.2 | 29.0 | 29.7 | 64.8 | 78.9 | 06:59 | 32 | 29.6 | 28.7 | 70.1 | 82.7 |
| 05:04 | 33.2 | 29.1 | 29.6 | 64.9 | 79.5 | 07:04 | 32 | 29.8 | 28.6 | 71 | 83.7 |
| 05:09 | 33.1 | 29.2 | 29.6 | 65.5 | 79.4 | 07:09 | 31.9 | 29.9 | 28.6 | 71.6 | 84.6 |
| 05:14 | 33.1 | 29.6 | 29.6 | 67.2 | 80 | 07:14 | 31.9 | 29.6 | 28.6 | 70.5 | 85.3 |
| 05:19 | 33.1 | 30.1 | 29.5 | 68.8 | 81.6 | 07:19 | 31.8 | 29.7 | 28.5 | 71.3 | 84.6 |
| 05:24 | 33 | 29.9 | 29.5 | 68.4 | 81.3 | 07:24 | 31.8 | 29.8 | 28.5 | 71.7 | 85.7 |
| 05:29 | 32.9 | 31.1 | 29.5 | 73 | 82.1 | 07:29 | 31.7 | 29.0 | 28.5 | 68.7 | 85.1 |
| 05:34 | 32.9 | 31.3 | 29.4 | 74 | 83.3 | 07:34 | 31.8 | 30.0 | 28.5 | 72.3 | 85.3 |
| 05:39 | 32.8 | 30.9 | 29.4 | 72.7 | 84.2 | 07:39 | 31.8 | 30.4 | 28.5 | 73.8 | 87.2 |
| 05:44 | 32.8 | 30.1 | 29.3 | 73.3 | 84.5 | 07:44 | 31.7 | 29.5 | 28.6 | 70.8 | 83.6 |
| 05:49 | 32.8 | 30.9 | 29.3 | 72.6 | 84 | 07:49 | 31.7 | 29.4 | 28.5 | 70.2 | 83.4 |
| 05:54 | 32.8 | 30.5 | 29.3 | 71.4 | 84.3 | 07:54 | 31.6 | 29.6 | 28.4 | 71.4 | 85.1 |
| 05:59 | 32.7 | 31.2 | 29.3 | 74.3 | 84.2 | 07:59 | 31.6 | 29.4 | 28.4 | 70.5 | 84.2 |
| 06:04 | 32.7 | 31.1 | 29.2 | 73.6 | 84.7 | 08:04 | 31.6 | 29.3 | 28.4 | 70.2 | 82.8 |
| 06:09 | 32.6 | 30.8 | 29.2 | 72.9 | 86.5 | 08:09 | 31.5 | 30.0 | 28.3 | 69.3 | 82 |
| 06:14 | 32.6 | 30.7 | 29.1 | 72.6 | 85.2 | 08:14 | 31.4 | 28.6 | 28.3 | 68.1 | 81.2 |
| 06:19 | 32.6 | 30.8 | 29.1 | 73 | 86.1 | 08:19 | 31.3 | 28.9 | 28.2 | 69.4 | 81.8 |
| 06:24 | 32.5 | 30.8 | 29.1 | 73.1 | 85.5 | 08:24 | 31.2 | 28.4 | 28.1 | 68 | 80.5 |
| 06:29 | 32.5 | 31.2 | 29.1 | 74.8 | 86.9 | 08:29 | 31.2 | 28.6 | 28 | 68.8 | 81.2 |

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

| เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) | เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ทฤษฎี | การวัด | | | | | ทฤษฎี | การวัด | | |
| 08:34 | 31.1 | 28.6 | 28 | 69.1 | 81.7 | 10:34 | 30.3 | 29.1 | 27.5 | 73.6 | 84.7 |
| 08:39 | 31.1 | 28.9 | 27.9 | 70.1 | 83 | 10:39 | 30.3 | 29.1 | 27.5 | 73.3 | 84.3 |
| 08:44 | 31 | 29.1 | 27.9 | 71.2 | 85.2 | 10:44 | 30.2 | 29.4 | 27.5 | 74.5 | 85.6 |
| 08:49 | 31 | 28.8 | 27.9 | 70.1 | 82.6 | 10:49 | 30.2 | 29.1 | 27.5 | 73.4 | 84.6 |
| 08:54 | 31 | 28.7 | 27.9 | 69.7 | 82.3 | 10:54 | 30.2 | 29.4 | 27.5 | 74.8 | 86 |
| 08:59 | 30.9 | 28.9 | 27.8 | 70.7 | 82.8 | 10:59 | 30.2 | 29.3 | 27.4 | 74.2 | 85.6 |
| 09:04 | 30.9 | 28.8 | 27.8 | 70.4 | 83 | 11:04 | 30.2 | 29.5 | 27.5 | 74.9 | 85.3 |
| 09:09 | 30.9 | 28.9 | 27.8 | 70.6 | 82.9 | 11:09 | 30.1 | 29.2 | 27.4 | 74.5 | 84.8 |
| 09:14 | 30.8 | 29.0 | 27.8 | 71.5 | 84.3 | 11:14 | 30.1 | 29.4 | 27.4 | 75.2 | 85.5 |
| 09:19 | 30.8 | 28.9 | 27.7 | 71.2 | 83.1 | 11:19 | 30.1 | 29.5 | 27.4 | 75.7 | 86 |
| 09:24 | 30.8 | 29.4 | 27.7 | 72.9 | 85.4 | 11:24 | 30.1 | 29.3 | 27.4 | 75 | 85.9 |
| 09:29 | 30.7 | 29.1 | 27.7 | 72.2 | 86 | 11:29 | 30.1 | 29.5 | 27.4 | 75.9 | 86.5 |
| 09:34 | 30.7 | 29.2 | 27.7 | 72.7 | 85.1 | 11:34 | 30.1 | 29.6 | 27.4 | 76 | 86.3 |
| 09:39 | 30.7 | 29.5 | 27.7 | 73.8 | 86.7 | 11:39 | 30 | 29.4 | 27.4 | 75.6 | 86 |
| 09:44 | 30.7 | 29.7 | 27.7 | 74.4 | 86.8 | 11:44 | 29.9 | 29.4 | 27.3 | 76 | 85.9 |
| 09:49 | 30.6 | 29.6 | 27.7 | 74.7 | 86.4 | 11:49 | 29.9 | 29.6 | 27.3 | 76.7 | 85.5 |
| 09:54 | 30.6 | 29.6 | 27.7 | 74.4 | 85.9 | 11:54 | 29.9 | 29.5 | 27.3 | 76.4 | 85.9 |
| 09:59 | 30.6 | 29.7 | 27.7 | 75 | 86.5 | 11:59 | 29.9 | 29.5 | 27.3 | 76.6 | 86 |
| 10:04 | 30.6 | 29.7 | 27.7 | 74.8 | 86.4 | 00:04 | 29.9 | 29.3 | 27.2 | 75.6 | 86 |
| 10:09 | 30.5 | 29.6 | 27.7 | 74.8 | 86.3 | 00:09 | 29.9 | 29.6 | 27.2 | 76.9 | 87.2 |
| 10:14 | 30.5 | 29.0 | 27.6 | 72.6 | 84.5 | 00:14 | 29.9 | 29.7 | 27.2 | 77.1 | 86.9 |
| 10:19 | 30.4 | 29.4 | 27.6 | 74.4 | 85.9 | 00:19 | 29.8 | 29.5 | 27.2 | 76.7 | 86.3 |
| 10:24 | 30.4 | 29.1 | 27.6 | 73.1 | 84.6 | 00:24 | 29.8 | 29.5 | 27.2 | 76.6 | 86.5 |
| 10:29 | 30.4 | 29.2 | 27.6 | 73.5 | 84.8 | 00:29 | 29.8 | 29.7 | 27.1 | 77.7 | 87.8 |

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

| เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) | เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ทฤษฎี | การวัด | | | | | ทฤษฎี | การวัด | | |
| 00:34 | 29.8 | 29.7 | 27.2 | 77.4 | 87.6 | 02:34 | 29.5 | 29.3 | 26.9 | 77 | 86 |
| 00:39 | 29.8 | 29.7 | 27.1 | 77.5 | 87 | 02:39 | 29.5 | 29.3 | 26.9 | 77 | 86.1 |
| 00:44 | 29.8 | 29.8 | 27.1 | 77.8 | 87 | 02:44 | 29.4 | 29.1 | 26.9 | 76.3 | 85.1 |
| 00:49 | 29.8 | 29.7 | 27.1 | 77.4 | 87.6 | 02:49 | 29.4 | 28.9 | 27 | 75.8 | 85.2 |
| 00:54 | 29.7 | 29.4 | 27.1 | 76.7 | 86.4 | 02:54 | 29.4 | 29.0 | 26.9 | 76.2 | 84.6 |
| 00:59 | 29.7 | 29.7 | 27.1 | 77.7 | 87.7 | 02:59 | 29.4 | 29.0 | 26.9 | 76.1 | 84.6 |
| 01:04 | 29.7 | 29.6 | 27.1 | 77.6 | 87.2 | 03:04 | 29.4 | 29.1 | 26.9 | 76.6 | 85 |
| 01:09 | 29.7 | 29.6 | 27 | 77.4 | 86.7 | 03:09 | 29.4 | 29.3 | 27 | 77.4 | 85.2 |
| 01:14 | 29.7 | 29.6 | 27.1 | 77.6 | 87.1 | 03:14 | 29.4 | 29.3 | 27 | 77.4 | 85.6 |
| 01:19 | 29.6 | | 27 | 78.6 | 87.9 | 03:19 | 29.4 | 29.3 | 26.9 | 77.4 | 85.4 |
| 01:24 | 29.6 | | 27.1 | 78.4 | 87.9 | 03:24 | 29.3 | 29.3 | 26.9 | 77.6 | 85.4 |
| 01:29 | 29.6 | | 27 | 78 | 87.7 | 03:29 | 29.2 | | 26.9 | 77.8 | 85.9 |
| 01:34 | 29.6 | | 27 | 78.4 | 87.8 | 03:34 | 29.2 | 29.2 | 26.9 | 77.4 | 85.7 |
| 01:39 | 29.6 | | 27 | 78.4 | 87.4 | 03:39 | 29.2 | | 26.8 | 77.8 | 86.2 |
| 01:44 | 29.6 | | 27 | 78.1 | 87.6 | 03:44 | 29.2 | 29.1 | 26.8 | 77 | 85.5 |
| 01:49 | 29.6 | | 27 | 77.5 | 86.7 | 03:49 | 29.2 | | 26.8 | 78.1 | 86.1 |
| 01:54 | 29.6 | 29.6 | 27 | 77.8 | 86.8 | 03:54 | 29.2 | | 26.8 | 77.7 | 86 |
| 01:59 | 29.5 | 29.5 | 27 | 77.6 | 86.6 | 03:59 | 29.1 | 29.1 | 26.8 | 77.5 | 85.9 |
| 02:04 | 29.5 | 29.4 | 27 | 77.5 | 86.8 | 04:04 | 29.1 | | 26.8 | 77.8 | 86 |
| 02:09 | 29.5 | | 27 | 78.2 | 87.2 | 04:09 | 29.2 | | 26.8 | 77.7 | 85.7 |
| 02:14 | 29.5 | | 27 | 77.8 | 87 | 04:14 | 29.1 | 28.9 | 26.8 | 76.8 | 85 |
| 02:19 | 29.5 | | 27 | 77.8 | 86.9 | 04:19 | 29.1 | 29.1 | 26.8 | 77.4 | 85.7 |
| 02:24 | 29.5 | | 27 | 78.1 | 87.2 | 04:24 | 29.1 | | 26.7 | 77.9 | 86.2 |
| 02:29 | 29.5 | | 26.9 | 77.9 | 87 | 04:29 | 29.1 | | 26.7 | 78.2 | 86.3 |

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

| เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) | เวลา | $T_{\infty}$ (°C) | $T_{cold}$ (°C) | | $\Phi_{\infty}$ (%) | $\Phi_{cold}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ทฤษฎี | การวัด | | | | | ทฤษฎี | การวัด | | |
| 04:34 | 29.1 | | 26.7 | 77.6 | 85.4 | 06:34 | 28.8 | | 26.5 | 78.1 | 86 |
| 04:39 | 29 | 28.9 | 26.7 | 76.9 | 85.3 | 06:39 | 28.8 | | 26.5 | 78.5 | 86.2 |
| 04:44 | 29 | | 26.7 | 78.1 | 86.1 | 06:44 | 28.8 | | 26.5 | 78.6 | 86.2 |
| 04:49 | 29 | | 26.7 | 77.5 | 86.1 | 06:49 | 28.8 | | 26.5 | 78.2 | 85.7 |
| 04:54 | 29 | | 26.7 | 77.5 | 85.5 | 06:54 | 28.8 | | 26.6 | 78.2 | 86.1 |
| 04:59 | 29 | | 26.6 | 78.4 | 86 | 06:59 | 28.8 | | 26.5 | 78.4 | 86 |
| 05:04 | 29 | | 26.6 | 78.2 | 85.9 | 07:04 | 28.8 | | 26.6 | 78.3 | 85.7 |
| 05:09 | 29 | | 26.6 | 77.9 | 86 | 07:09 | 28.8 | | 26.6 | 78 | 85.5 |
| 05:14 | 28.9 | | 26.6 | 77.8 | 85.5 | 07:14 | 28.8 | | 26.6 | 78.5 | 85.9 |
| 05:19 | 28.9 | | 26.6 | 77.9 | 85.5 | 07:19 | 28.8 | | 26.6 | 78.7 | 86.2 |
| 05:24 | 28.9 | 28.8 | 26.6 | 77.1 | 85 | 07:24 | 28.8 | | 26.7 | 78.7 | 85.9 |
| 05:29 | 28.9 | | 26.6 | 77.7 | 85.3 | 07:29 | 28.8 | | 26.7 | 78.7 | 85.6 |
| 05:34 | 28.9 | | 26.6 | 77.8 | 85.9 | 07:34 | 28.8 | | 26.7 | 77.7 | 85.3 |
| 05:39 | 28.9 | | 26.6 | 77.8 | 85.6 | 07:39 | 28.8 | | 26.7 | 78.6 | 85.6 |
| 05:44 | 28.9 | | 26.6 | 77.9 | 85.6 | 07:44 | 28.8 | | 26.7 | 78.5 | 85.9 |
| 05:49 | 28.9 | | 26.6 | 77.9 | 86 | 07:49 | 28.9 | | 26.7 | 78.5 | 85.9 |
| 05:54 | 28.8 | | 26.5 | 78 | 86 | 07:54 | 28.8 | | 26.7 | 78.9 | 86.1 |
| 05:59 | 28.9 | | 26.5 | 78 | 86.2 | 07:59 | 28.8 | | 26.8 | 78.8 | 85.7 |
| 06:04 | 28.8 | | 26.5 | 78 | 86 | 08:04 | 28.9 | | 26.8 | 78.8 | 85.9 |
| 06:09 | 28.8 | | 26.5 | 77.8 | 85.5 | 08:09 | 28.9 | | 26.8 | 78.5 | 85.3 |
| 06:14 | 28.8 | | 26.5 | 77.9 | 85.9 | 08:14 | 28.9 | | 26.9 | 79.3 | 85.5 |
| 06:19 | 28.8 | | 26.5 | 77.4 | 85.6 | 08:19 | 28.9 | | 27 | 78.3 | 84.8 |
| 06:24 | 28.8 | | 26.5 | 78.1 | 85.6 | 08:24 | 29 | | 27 | 78.2 | 84.9 |
| 06:29 | 28.8 | | 26.5 | 78.7 | 86.2 | 08:29 | 29 | | 27.1 | 78 | 83.8 |

ตารางภาคผนวก ก-6 มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานจากถุงเชื้อเห็ด V1 – V34 ซึ่งเพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นในช่วงเวลา 60 วัน

| วันที่ | | มวลเห็ด (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 | V15 | V16 | V17 | V18 | V19 | V20 | V21 | V22 | V23 | V24 | V25 | V26 | V27 | V28 | V29 | V30 | V31 | V32 | V33 | V34 |
| 7 | 21-ต.ค.-58 | | | 65 | 55 | | 35 | | 50 | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 22-ต.ค.-58 | | | | | | | | | | 45 | | 55 | | | | | 75 | | | | | 45 | | 35 | | | | | | 35 | | | | |
| 9 | 23-ต.ค.-58 | 35 | 30 | | | | | | | | | | | | | | 35 | | | 55 | | | | | | 35 | | | | | | | 60 | 35 | |
| 10 | 24-ต.ค.-58 | | | | | | | | | | | 45 | | 40 | 65 | 54 | | | | | | 45 | | 45 | | | | | 35 | | | 55 | | | 50 |
| 11 | 25-ต.ค.-58 | | | | | 35 | | 45 | | | | | | | | | | | 35 | | 40 | | | | | | 35 | | | 40 | | | | | |
| 12 | 26-ต.ค.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25 | | | | | | | |
| 18 | 1-พ.ย.-58 | | | 65 | 50 | | 25 | | | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 2-พ.ย.-58 | | | | | | | | 50 | | 45 | | 55 | | | | | 75 | | | | | 55 | | | 40 | | | | | | | | | |
| 20 | 3-พ.ย.-58 | 35 | 35 | | | | | | | | | | | | | | 25 | | | 55 | | | | | 55 | | | | | 45 | | 65 | | |
| 21 | 4-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | 45 | | 40 | 65 | 55 | | | 45 | | | | | 35 | | | | | 35 | | | 50 | | 55 | 45 |
| 22 | 5-พ.ย.-58 | | | | | 45 | | 35 | | | | | | | | | | | | | 45 | 35 | | | | | 55 | 45 | | 45 | | | | | |
| 29 | 12-พ.ย.-58 | | | 68 | 55 | | 25 | | 55 | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 13-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | 60 | | 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ตารางภาคผนวก ก-6 (ต่อ)

| วันที่ | | มวลเห็ด (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 | V15 | V16 | V17 | V18 | V19 | V20 | V21 | V22 | V23 | V24 | V25 | V26 | V27 | V28 | V29 | V30 | V31 | V32 | V33 | V34 |
| 31 | 14-พ.ย.-58 | 35 | 30 | | | | | | | | | | | | | | 45 | 65 | | | | | 45 | | 35 | | | | | | 35 | | | | |
| 32 | 15-พ.ย.-58 | | | | | 50 | | | | | | 45 | | 40 | 70 | 55 | | | | 55 | | | | | | 30 | | | | | | | 58 | 35 | |
| 33 | 16-พ.ย.-58 | | | | | | | 25 | | | | | | | | | | | | | | 45 | | 55 | | | | | 35 | | | 55 | | | 75 |
| 34 | 17-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 35 | | 40 | | | | | | 35 | | | 45 | | | | | |
| 35 | 18-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 60 | | | | | | | |
| 40 | 23-พ.ย.-58 | | | 60 | 55 | | 50 | | | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | 24-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | 45 | | 60 | | | | | 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | 25-พ.ย.-58 | 35 | 35 | | | | | | | | | | | | | | 35 | | | | | | 45 | | 35 | | | | | | 25 | | | | |
| 43 | 26-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | 40 | | 40 | 65 | 55 | | | | 54 | | | | | | 30 | | | | | | | 60 | | |
| 44 | 27-พ.ย.-58 | | | | | 45 | | 35 | | | | | | | | | | | | | | 45 | | 35 | | | | | 36 | | | 60 | | 35 | 50 |
| 45 | 28-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25 | | 40 | | | | | | 25 | 45 | | 40 | | | | | |
| 51 | 4-ธ.ค.-58 | | | 70 | 45 | | 55 | | | 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | 5-ธ.ค.-58 | | | | | | | | | | 45 | | 55 | | | | | 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ตารางภาคผนวก ก-6 (ต่อ)

| วันที่ | | มวลเห็ด (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 | V15 | V16 | V17 | V18 | V19 | V20 | V21 | V22 | V23 | V24 | V25 | V26 | V27 | V28 | V29 | V30 | V31 | V32 | V33 | V34 |
| 53 | 6-ธ.ค.-58 | 40 | 30 | | | | | | | | | | | | | | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 54 | 7-ธ.ค.-58 | | | | | | | | | | | 45 | | 40 | 75 | 55 | | | | | | | 45 | | 35 | | | | | | 35 | | | | |
| 55 | 8-ธ.ค.-58 | | | | | 45 | | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 30 | | | | | | | 60 | 35 | |
| 56 | 9-ธ.ค.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 60 | | 45 | | | | | 45 | | | 55 | | | 50 |
| 57 | 10-ธ.ค.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 35 | | 40 | | | | | | 35 | | | 40 | | | | | |
| 58 | 11-ธ.ค.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 55 | | | | | | | |
| มวลเห็ดรวมแต่ละถุง (g) | | 180 | 160 | 328 | 260 | 220 | 190 | 165 | 155 | 245 | 240 | 220 | 280 | 200 | 340 | 274 | 165 | 365 | 175 | 219 | 205 | 230 | 235 | 215 | 195 | 165 | 185 | 230 | 186 | 210 | 175 | 275 | 303 | 195 | 270 |

ตารางภาคผนวก ก-7 มวลของเห็ดนางฟ้าภูฐานจากถุงเชื้อเห็ด H1 – H34 ซึ่งเพาะเลี้ยงในห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้ในช่วงเวลา 60 วัน

| วันที่ | | มวลเห็ด (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 | H7 | H8 | H9 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 | H26 | H27 | H28 | H29 | H30 | H31 | H32 | H33 | H34 |
| 9 | 23-ต.ค.-58 | | | 55 | 45 | | | | | | | 40 | | 25 | | | | 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 24-ต.ค.-58 | | 55 | | | | | | | 20 | 30 | | | | | 55 | | | 45 | 25 | | | 40 | | | | 20 | | | | 25 | | | 25 | |
| 11 | 25-ต.ค.-58 | 75 | | | | 55 | 45 | | 30 | | | | | | 20 | | 30 | | | | 60 | 30 | | 30 | | 25 | | | 50 | | | | | | 55 |
| 12 | 26-ต.ค.-58 | | | | | | | 35 | | | | | 40 | | | | | | | | | | | | 20 | | | | | 25 | | 25 | 30 | | |
| 13 | 27-ต.ค.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 35 | | | | | | | |
| 21 | 4-พ.ย.-58 | | | | 45 | | | | | | | 35 | | 35 | | | | 55 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 5-พ.ย.-58 | | 55 | 45 | | 65 | | | | 65 | 35 | | | | | 55 | | | 45 | 45 | 65 | | | | | | 35 | | 50 | | 35 | | | 35 | |
| 23 | 6-พ.ย.-58 | 45 | | | | | | 55 | 30 | | | | | | 45 | | 35 | | | | | 30 | | 30 | | 35 | | | | | | | | | |
| 24 | 7-พ.ย.-58 | | | | | | 55 | | | | | | | | | | | | | | | | 40 | | 40 | | | 55 | | | | | 30 | | 65 |
| 25 | 8-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | 35 | | 35 | | | |
| 35 | 18-พ.ย.-58 | | | 55 | | | | | | | | 60 | | | | 60 | | 45 | 45 | | 55 | | | | | | | | | | 55 | | | 35 | |
| 36 | 19-พ.ย.-58 | | 55 | | | 55 | 50 | | | 45 | 30 | | | 45 | | | 30 | | | 60 | | 30 | 40 | 30 | | 35 | 35 | | 50 | | | | | | |
| 37 | 20-พ.ย.-58 | 35 | | | | | | 35 | 30 | | | | | | 75 | | | | | | | | | | 45 | | | 45 | | | | 50 | 30 | | 50 |

ตารางภาคผนวก ก-7 (ต่อ)

| วันที่ | | มวลเห็ด (g) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 | H7 | H8 | H9 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 | H26 | H27 | H28 | H29 | H30 | H31 | H32 | H33 | H34 |
| 38 | 21-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | 22-พ.ย.-58 | | | | | | | | | | | | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 3-ธ.ค.-58 | | | 50 | | | | | | | | 35 | | 65 | | | | 55 | | 25 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 51 | 4-ธ.ค.-58 | 35 | 60 | | | 55 | | 35 | | 80 | 30 | | | | 35 | 55 | | | 45 | | 65 | | | | | | 35 | | | | 45 | | | 65 | |
| 52 | 5-ธ.ค.-58 | | | | | | 45 | | 30 | | | | | | | | | | | | | | 40 | 30 | | 35 | | | 48 | | | | | | 50 |
| 53 | 6-ธ.ค.-58 | | | | | | | | | | | | 35 | | | | | | | | | 45 | | | 35 | | | 45 | | | | 35 | 30 | | |
| มวลเห็ดรวมแต่ละถุง (g) | | 190 | 225 | 205 | 90 | 230 | 195 | 160 | 120 | 210 | 125 | 170 | 155 | 170 | 175 | 225 | 95 | 210 | 180 | 155 | 245 | 135 | 160 | 120 | 140 | 130 | 125 | 180 | 198 | 60 | 160 | 145 | 120 | 160 | 220 |

**ภาคผนวก ข**

ภาพที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

ภาพภาคผนวก ข-1 ห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นที่สร้างขึ้น
ด้านซ้าย: ยังไม่รดน้ำลงในทราย
ด้านขวา: รดน้ำลงในทรายแล้ว

ภาพภาคผนวก ข-2 การเขียนป้ายชื่อบนถุงเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐาน
ด้านซ้าย: ถุงเชื้อเห็ด V1 – V34 สำหรับห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา
ด้านขวา: ถุงเชื้อเห็ด H1 – H34 สำหรับห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้

ภาพภาคผนวก ข-3 การจัดเรียงถุงเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานในห้องเพาะเลี้ยงและการติดตั้งดาต้าล็อกเกอร์
ด้านซ้าย: ห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น
ด้านขวา: ห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้

ภาพภาคผนวก ข-4 การคลุมและปิดล้อมห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน

ภาพภาคผนวก ข-5 เห็ดนางฟ้าภูฐานเริ่มงอก
ด้านซ้าย : เห็ดจากห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น
ด้านขวา : เห็ดจากห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้

ภาพภาคผนวก ข-6 เห็ดนางฟ้าภูฐานกำลังเจริญเติบโตในห้องเพาะเลี้ยง
ด้านซ้าย : เห็ดจากห้องเพาะเลี้ยงตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น
ด้านขวา : เห็ดจากห้องเพาะเลี้ยงแบบที่เกษตรกรนิยมใช้

ภาพภาคผนวก ข-7 ตัวอย่างเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงแบบปกติ

ภาพภาคผนวก ข-8 ตัวอย่างเห็ดนางฟ้าภูฐานที่เก็บมาจากห้องเพาะเลี้ยงที่ศึกษา

**ภาคผนวก ค**

ตัวอย่างการคำนวณ

จากหัวข้อที่ 3.3 ขั้นตอนและแนวทางการทดลองในการวิจัย ในบทที่ 3 นั้น ผู้วิจัยได้ระบุค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษานี้ดังตารางที่ 1 ในบทที่ 4 และใช้ค่าพารามิเตอร์จากสิ่งแวดล้อม $T_\infty = 30\,^\circ\text{C}$, $\Phi_\infty = 60\,\%$ เป็นกรณีอ้างอิง ดังที่แสดงในตารางที่ 2 และได้แสดงวิธีคำนวณดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) เนื่องจากไม่ทราบค่าอุณหภูมิ $T_w$ จึงต้องแก้ระบบสมการแบบวนซ้ำ (Date, 2012) โดยสมมติค่า $T_w = 25\,^\circ\text{C}$ และหาค่า $\omega_{v,w}$ จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (Crawford, Kays, 1993 cited in Date, 2012)

$$\begin{aligned}\omega_{v,w} \cong\ & 3.416\times10^{-3} + \left(2.7308\times10^{-4}\right)T_w + \left(1.372\times10^{-5}\right)T_w^2 + \left(8.2516\times10^{-8}\right)T_w^3 \\ & - \left(6.9092\times10^{-9}\right)T_w^4 + \left(3.5313\times10^{-10}\right)T_w^5 - \left(3.7037\times10^{-12}\right)T_w^6 \\ & + \left(6.1923\times10^{-15}\right)T_w^7 + \left(9.9349\times10^{-17}\right)T_w^8\end{aligned} \tag{37}$$

จึงได้ $\omega_{v,w} = 0.0200055$

2) หาค่า $\omega_{v,\infty}$ จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (Wagner, Pruss, 1993 cited in Date, 2012)

$$\omega_{v,\infty} = \frac{W_\infty}{1+W_\infty} \tag{38}$$

เมื่อ $W_\infty = 0.622\times\left(\dfrac{p_{v,\infty}}{p_{tot}-p_{v,\infty}}\right)$ และ $\dfrac{p_{v,\infty}}{p_{sat}} = \dfrac{\Phi_\infty}{100}$

โดยที่ $\dfrac{p_{sat}}{p_{cr}} = \exp\left\{\dfrac{F}{1-\tau}\right\}$ เมื่อ $\tau = 1-\dfrac{T_\infty}{T_{cr}}$ และ

$$\begin{aligned}F &= a1\times\tau + a2\times\tau^{1.5} + a3\times\tau^3 + a4\times\tau^{3.5} + a5\times\tau^4 + a6\times\tau^{7.5} \\ a1 &= -7.85951783,\ a2 = 1.84408295,\ a3 = -11.7866497, \\ a4 &= 22.6807411,\ a5 = -15.9618719,\ a6 = 1.80122502\end{aligned}$$

ทั้งนี้ $T_{cr} = 647.096$ K, $p_{cr} = 220.64$ bar และ $p_{tot} = 1.01324$ bar

จึงได้ $\omega_{v,\infty} = 0.0190745$

แล้วนำมาใช้หาค่าเฉลี่ย $\omega_{v,mean} = 0.5(\omega_{v,\infty} + \omega_{v,w})$ ซึ่งได้ $\omega_{v,mean} = 0.0195265$
และหาค่า $Cp_m = Cp_a(1-\omega_{v,mean}) + Cp_v\omega_{v,mean}$ ซึ่งได้ $Cp_m = 1{,}023.8904$ J/kg-K

3) หาค่า $\alpha_o$ ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (McAdams, 1954 cited in Date, 2012)

$$Nu_H = \frac{\alpha_o H}{k_a} \qquad \text{และ} \qquad Gr_H = \frac{9.81\beta(T_\infty - T_w)H^3}{\nu_a^2} \tag{39}$$

ซึ่งสำหรับการพาความร้อนตามธรรมชาติจากผิวในแนวดิ่งจะใช้ $Nu_H = 0.59(Gr_H \Pr)^{0.25}$ เมื่อ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร $\beta = 1.0/T_{mean}$ และ $T_{mean} = 0.5(T_w + T_\infty)$ (ในหน่วย K) ซึ่งต้องใช้ค่า $\Pr$, $k_a$ และ $\nu_a$ ที่ $T_{mean}$ (Frank P. Incropera et. al., 2013)
จึงได้ $\alpha_o = 2.5814211$ W/m$^2$-K

4) เมื่อทราบ $\alpha_o$ หาค่า $g$ จากสมการ (20) และจะได้ $Bi_m$, $B^*$ และ $\dot{m}_{w,m}$ จากสมการ (23)
จึงได้ $g = 0.0025212$ kg/m$^2$-s, $Bi_m = 420{,}198.1358, B^* = 2.3659149\times10^{-6}$ และ $\dot{m}_{w,m} = 6.7461634\times10^{-9}$ kg/s

5) หาค่า $Q_{in} = (Q_{rad} + Q_{nc}) = (\alpha_{rad} + \alpha_o)A_o(T_\infty - T_w)$ เมื่อ
$\alpha_{rad} = \varepsilon\sigma(T_\infty^2 + T_w^2)(T_\infty + T_w)$
จึงได้ $Q_{in} = 60.6230802$ W

6) หาค่า $\dot{m}_{w,e}$ จากสมการ (36) จึงได้ $\dot{m}_{w,e} = 0.002348158$ W

7) คำนวณร้อยละความแตกต่างจึงได้ $F = 34{,}807{,}211.74$ ซึ่งพบว่า $F > 0.01$ จึงต้องแก้ไขค่า $T_w$ แล้วคำนวณใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1)

8) ทำต่อเนื่องไปจนกว่าค่า $F$ จะลู่เข้า 0.01 จึงได้ $T_w = 26.5513$ K ที่ใช้ได้ จึงนำไปเป็นค่าที่ใช้หา $T_{cold}$ ซึ่งทำให้ได้ $T_{cold} = 25.5407$ K และค่าอื่น ๆ ดังในตารางที่ 2

9) คำนวณหาค่า $T_{dp}$ จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (Wagner, Pruss, 1993 cited in Date, 2012)

$$T_{dp} = \frac{237.7\times\gamma}{17.271-\gamma} \quad \text{เมื่อ} \qquad \gamma = \frac{17.271\times T_\infty}{237.7+T_\infty} + \ln\left(\frac{\Phi_\infty}{100}\right) \tag{40}$$

จึงได้ $T_{dp} = 21.3704$ °C

10) คำนวณค่า $\eta_{th}$ จากสมการที่ (16) จึงได้ $\eta_{th} = 0.5167$

<u>หมายเหตุ</u> : ในการวิจัยนี้ ทุกครั้งที่มีการคำนวณค่า $T_{cold}$ และ $\eta_{th}$ จะต้องดำเนินการตามขั้นตอนการคำนวณข้างต้นเสมอ ซึ่งได้ปรากฏผลการคำนวณและนำข้อมูลไปศึกษา ดังในภาพที่ 14 – 22 ในบทที่ 4

**ภาคผนวก ง**

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม

IBM SPSS Statistics 22

**ผลการใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 22 ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง T_cold_m กับ $T_\infty$ และ $\Phi_\infty$**

```
REGRESSION
  /MISSING LISTWISE
  /STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA
  /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
  /NOORIGIN
  /DEPENDENT Tcold
  /METHOD=ENTER Tsur Hsur.
```

**Regression**

| Notes | | |
|---|---|---|
| Output Created | | |
| Comments | | |
| Input | Data | |
| | Active Dataset | |
| | Filter | |
| | Weight | |
| | Split File | |
| | N of Rows in Working Data File | |
| Missing Value Handling | Definition of Missing | |
| | Cases Used | |
| Syntax | | |
| Resources | Processor Time | |
| | Elapsed Time | |
| | Memory Required | |
| | Additional Memory Required for Residual Plots | |

**Notes**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Output Created | | | 20-MAY-2016 10:28:12 |
| Comments | | | |
| Input | Data | | D:\Thesis\วิทยานิพนธ์\data for fig 22-23.sav |
| | Active Dataset | | DataSet0 |
| | Filter | | <none> |
| | Weight | | <none> |
| | Split File | | <none> |
| | N of Rows in Working Data File | | 289 |
| Missing Handling | Value Definition of Missing | | User-defined missing values are treated as missing. |
| | Cases Used | | Statistics are based on cases with no missing values for any variable used. |
| Syntax | | | REGRESSION<br>/MISSING LISTWISE<br>/STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA<br>/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)<br>/NOORIGIN<br>/DEPENDENT Tcold<br>/METHOD=ENTER Tsur Hsur. |
| Resources | Processor Time | | 00:00:00.02 |
| | Elapsed Time | | 00:00:00.03 |
| | Memory Required | | 2896 bytes |
| | Additional Memory Required for Residual Plots | | 0 bytes |

[DataSet0] D:\Thesis\วิทยานิพนธ์\data for fig 22-23.sav

**Variables Entered/Removed[a]**

| Model | Variables Entered | Variables Removed | Method |
|---|---|---|---|
| 1 | Hsur, Tsur[b] | . | Enter |

a. Dependent Variable: Tcold

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .978[a] | .957 | .956 | .287 |

a. Predictors: (Constant), Hsur, Tsur

**ANOVA[a]**

| Model | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Regression | 521.006 | 2 | 260.503 | 3158.177 | .000[b] |
| | Residual | 23.591 | 286 | .082 | | |
| | Total | 544.597 | 288 | | | |

a. Dependent Variable: Tcold

b. Predictors: (Constant), Hsur, Tsur

**Coefficients**[a]

| Model | | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B | Std. Error | Beta | | |
| 1 | (Constant) | 9.800 | 1.217 | | 8.051 | .000 |
| | Tsur | .669 | .025 | .832 | 26.518 | .000 |
| | Hsur | -.032 | .006 | -.157 | -4.994 | .000 |

a. Dependent Variable: Tcold

**ผลการใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 22 ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Φ_cold_m กับ T_∞ และ Φ_∞**

```
REGRESSION
 /MISSING LISTWISE
 /STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA
 /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
 /NOORIGIN
 /DEPENDENT Hcold
 /METHOD=ENTER Tsur Hsur.
```

**Regression**

**Notes**

| | | |
|---|---|---|
| Output Created | | |
| Comments | | |
| Input | | Data |
| | | Active Dataset |
| | | Filter |
| | | Weight |
| | | Split File |
| | | N of Rows in Working Data File |
| Missing | Value | Definition of Missing |
| Handling | | Cases Used |
| Syntax | | |
| Resources | | Processor Time |
| | | Elapsed Time |
| | | Memory Required |
| | | Additional Memory Required for Residual Plots |

**Notes**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Output Created | | | 20-MAY-2016 10:43:44 |
| Comments | | | |
| Input | Data | | D:\Thesis\วิทยานิพนธ์\data for Tcold in fig 22-23.sav |
| | Active Dataset | | DataSet0 |
| | Filter | | <none> |
| | Weight | | <none> |
| | Split File | | <none> |
| | N of Rows in Working Data File | | 289 |
| Missing Value Handling | Definition of Missing | | User-defined missing values are treated as missing. |
| | Cases Used | | Statistics are based on cases with no missing values for any variable used. |
| Syntax | | | REGRESSION<br>/MISSING LISTWISE<br>/STATISTICS COEFF OUTS R ANOVA<br>/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)<br>/NOORIGIN<br>/DEPENDENT Hcold<br>/METHOD=ENTER Tsur Hsur. |
| Resources | | Processor Time | 00:00:00.02 |
| | | Elapsed Time | 00:00:00.02 |
| | | Memory Required | 2896 bytes |
| | | Additional Memory Required for Residual Plots | 0 bytes |

[DataSet0] D:\Thesis\วิทยานิพนธ์\data for Tcold in fig 22-23.sav

**Variables Entered/Removed[a]**

| Model | Variables Entered | Variables Removed | Method |
|---|---|---|---|
| 1 | Hsur, Tsur[b] | . | Enter |

a. Dependent Variable: Hcold

b. All requested variables entered.

**Model Summary**

| Model | R | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---|---|---|---|---|
| 1 | .944[a] | .892 | .891 | 1.753 |

a. Predictors: (Constant), Hsur, Tsur

**ANOVA[a]**

| Model | | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Regression | 7243.540 | 2 | 3621.770 | 1178.943 | .000[b] |
| | Residual | 878.606 | 286 | 3.072 | | |
| | Total | 8122.146 | 288 | | | |

a. Dependent Variable: Hcold

b. Predictors: (Constant), Hsur, Tsur

Coefficients[a]

| Model | | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | B | Std. Error | Beta | | |
| 1 | (Constant) | -12.969 | 7.428 | | -1.746 | .082 |
| | Tsur | .883 | .154 | .284 | 5.734 | .000 |
| | Hsur | .942 | .039 | 1.199 | 24.188 | .000 |

a. Dependent Variable: Hcold