



การอบแห้งหมอนแมลงวันลายด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนเพื่อเป็นอาหารจิ้งหรีด

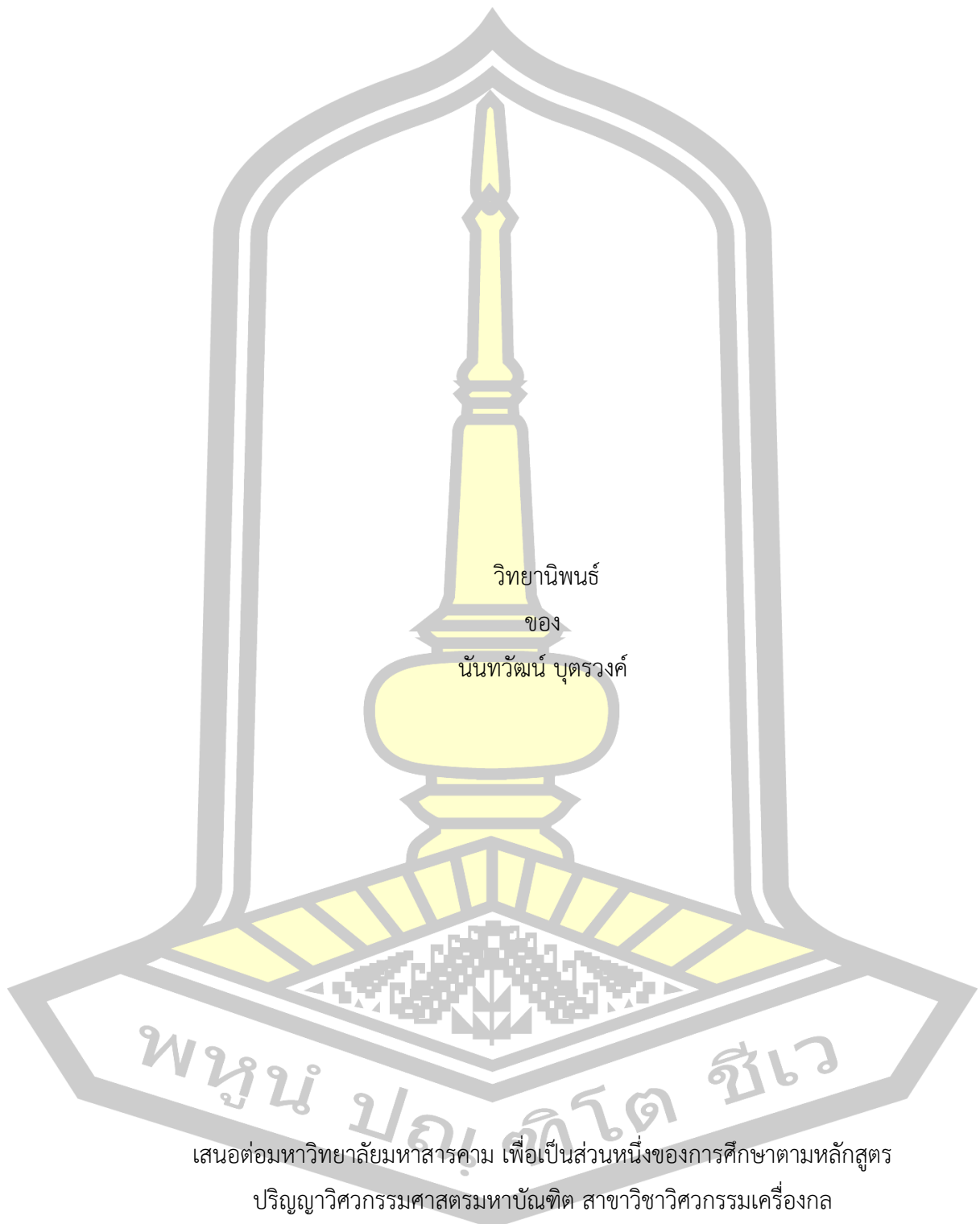
วิทยานิพนธ์
ของ
นันทวัฒน์ บุตรวงศ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนเพื่อเป็นอาหารจิ้งหรีด



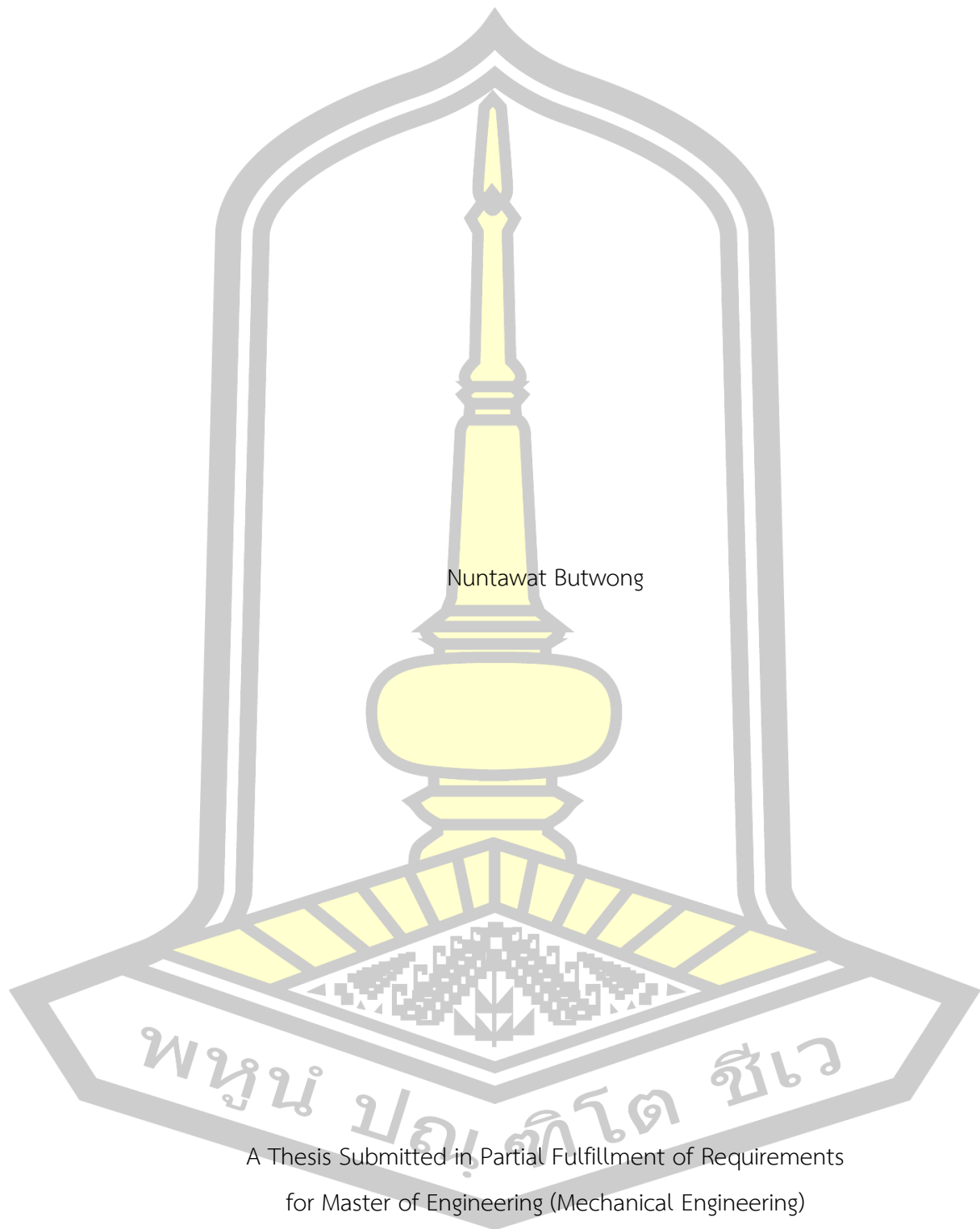
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มิถุนายน 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Drying of black soldier fly with rotation hot air for cricket feed



Nuntawat Butwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Mechanical Engineering)

June 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายันทวัฒน์ บุตรวงศ์
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. คำนึ่ง วาทยธธา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. โสภา แคนสี)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กวิสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยลมร้อนแบบภาดหมุนเพื่อเป็นอาหารจิ้งหรีด
ผู้วิจัย นันทวัฒน์ บุตรวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภา แคนสี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2567

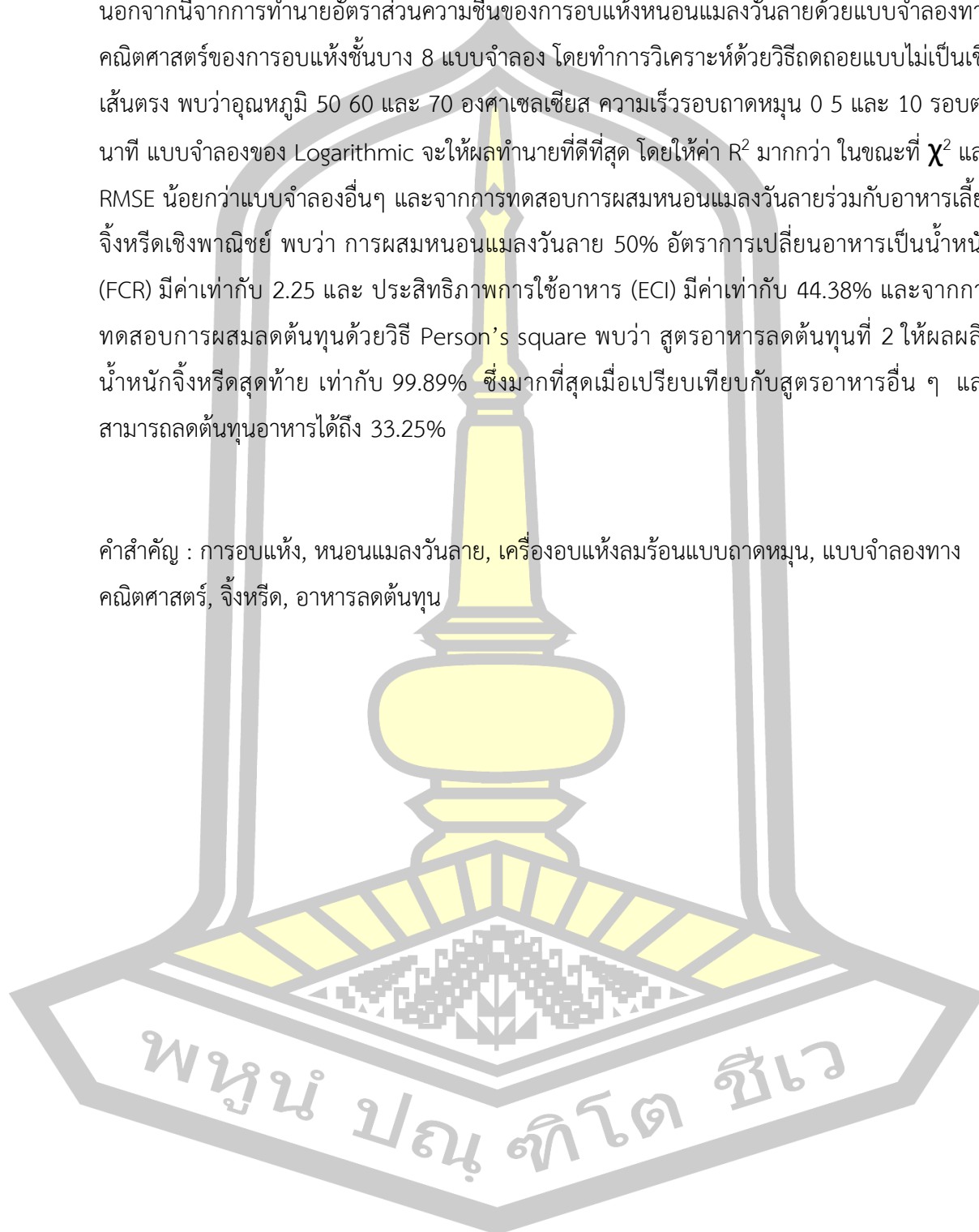
บทคัดย่อ

การอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนภาดหมุนเพื่อใช้เป็นอาหารจิ้งหรีด มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งชั้นบาง มีปัจจัยการอบแห้ง คือ อุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ (50 60 และ 70 องศาเซลเซียส) ความเร็วรอบภาดหมุน 3 ระดับ (0 5 และ 10 รอบต่อนาที) ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที มีวิธีการการดำเนินการทดลอง โดยการเตรียมหนอนแมลงวันลายจำนวน 300 กรัมต่อตัวอย่าง มีความหนาเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร สุ่มหาความชื้นเริ่มต้น ก่อนนำไปอบด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนภาดหมุน และทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 30 นาที จนความชื้นสุดท้ายประมาณ 10 %w.b. และนำหนอนแมลงวันลายไปบดละเอียด เพื่อเป็นส่วนผสมกับพืชอาหารสัตว์ในท้องถื่น (กากถั่วเหลือง ข้าวโพด ข้าวสาลี) และทำการทดลองการผสมหนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ทั้งหมด 4 สูตร (ผสมหนอนแมลงวันลาย 0% 25% 50% และ 75%) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ก่อนทำการผสมร่วมกับพืชอาหารสัตว์ในท้องถื่นด้วยวิธี Person's square ซึ่งได้อาหารลดต้นทุนได้ทั้งหมด 3 สูตร เพื่อเปรียบเทียบกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ ซึ่งในการทดลองใช้จิ้งหรีดอายุ 21-25 วัน (ระยะก่อนโตเต็มวัย) โดยใช้ตัวอย่างจิ้งหรีดมีน้ำหนัก 900 กรัมต่อบ่อเลี้ยงขนาด 1 ตารางเมตร และทำบันทึกข้อมูลการกินอาหาร และชั่งน้ำหนักจิ้งหรีดก่อนเก็บผลผลิตจิ้งหรีดเพื่อศึกษาค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) และ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (ECI) ต่อไป

จากการทดลองพบว่าความชื้นเริ่มต้นในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายอยู่ในช่วง 64.2-67.1 %w.b. ส่วนการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนภาดหมุนที่อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วรอบภาดหมุนแต่ละปัจจัย พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนภาดเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและใช้ระยะเวลาในอบแห้งที่ต่ำที่สุด คือ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 10 รอบต่อนาที มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 10.37 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

ความขึ้นประสิทธิผลจะอยู่ในช่วง ในช่วง 2.533×10^{-9} ถึง 1.04×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที นอกจากนี้จากการทำนายอัตราส่วนความขึ้นของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง 8 แบบจำลอง โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง พบว่าอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบพัดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที แบบจำลองของ Logarithmic จะให้ผลทำนายที่ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ X^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ และจากการทดสอบการผสมหนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เชิงพาณิชย์ พบว่า การผสมหนอนแมลงวันลาย 50% อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) มีค่าเท่ากับ 2.25 และ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (ECI) มีค่าเท่ากับ 44.38% และจากการทดสอบการผสมลดต้นทุนด้วยวิธี Person's square พบว่า สูตรอาหารลดต้นทุนที่ 2 ให้ผลผลิตน้ำหนักจุลินทรีย์สุดท้าย เท่ากับ 99.89% ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอาหารอื่น ๆ และสามารถลดต้นทุนอาหารได้ถึง 33.25%

คำสำคัญ : การอบแห้ง, หนอนแมลงวันลาย, เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบพัดหมุน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, จุลินทรีย์, อาหารลดต้นทุน



TITLE Drying of black soldier fly with rotation hot air for cricket feed
AUTHOR Nuntawat Butwong
ADVISORS Assistant Professor Sopa Cansee , Ph.D.
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Mechanical Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2024

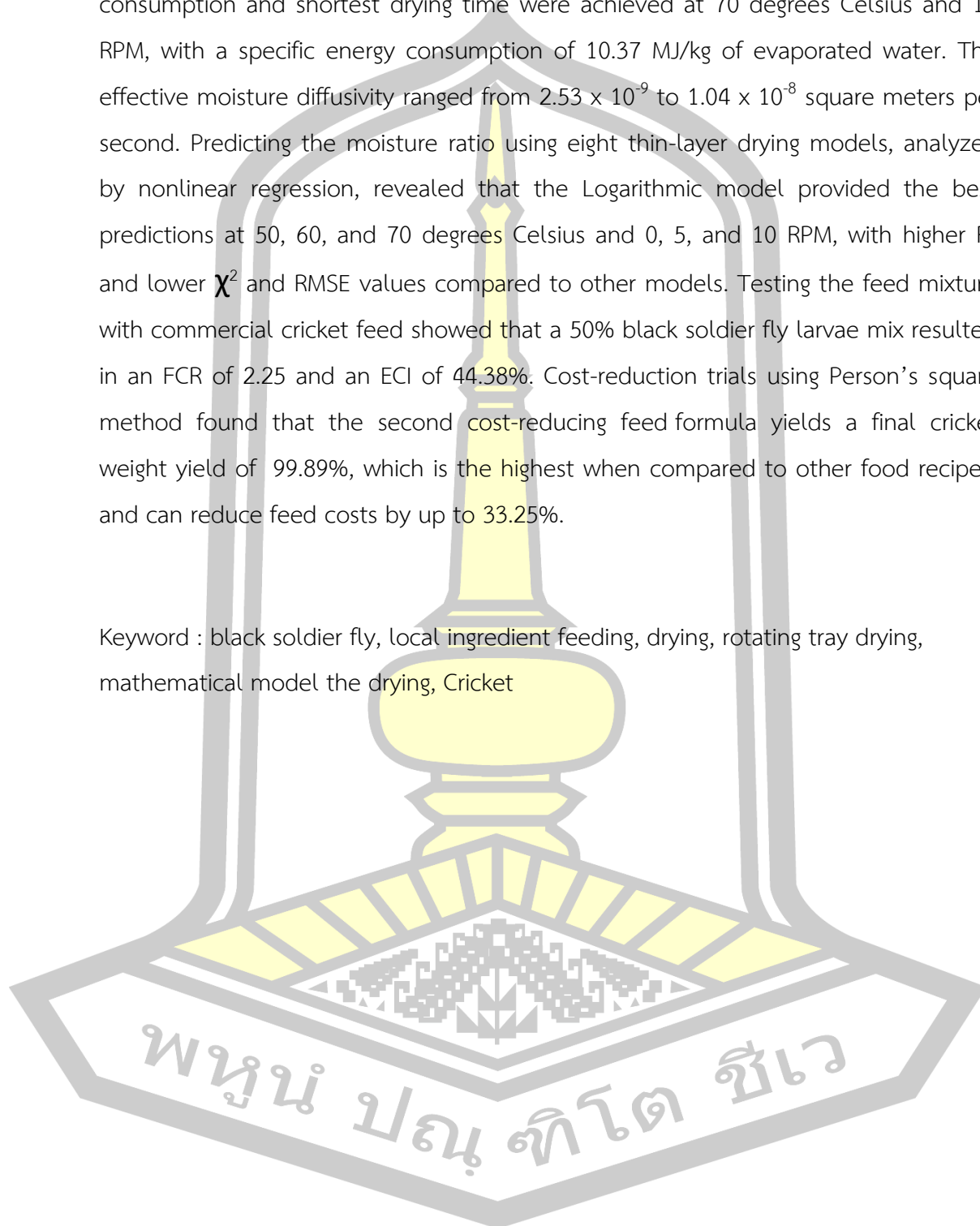
ABSTRACT

Drying black soldier fly larvae using a hot air rotating tray dryer for cricket feed. The objective of this study was to examine the drying behavior, specific energy consumption, effective moisture diffusivity, and mathematical modeling of thin-layer drying equations of black soldier fly larvae using a hot air rotary tray dryer to be used as cricket feed. The drying factors included three drying temperatures (50, 60, and 70 degrees Celsius) and three rotary tray speeds (0, 5, and 10 RPM) at an average air velocity of 3 meters per second. The experimental procedure involved preparing 300 grams of black soldier fly larvae per sample with an average thickness of 5 millimeters. Initial moisture content was randomly measured before drying with the rotary tray dryer, and weight changes were recorded every 30 minutes until the final moisture content reached approximately 10% w.b. The dried larvae were then finely ground to be mixed with local agricultural feed ingredients (soybean meal, corn, rice) and tested in four different feed formulas for crickets (0%, 25%, 50%, and 75% black soldier fly larvae) using Person's square method. Three cost-reduced formulas were derived and compared to commercial cricket feed. The trials used 21-25 day old crickets (pre-adult stage), with 900 grams of crickets per square meter of rearing space. Data on feed intake and weight were recorded to study the feed conversion ratio (FCR) and efficiency of conversion of ingested feed (ECI).

The results showed that the initial moisture content of black soldier fly larvae ranged from 64.2-67.1% w.b. Drying the larvae with the hot air rotary tray dryer at different temperatures and rotary tray speeds indicated that increasing

temperature and tray speed increased the drying rate. The lowest specific energy consumption and shortest drying time were achieved at 70 degrees Celsius and 10 RPM, with a specific energy consumption of 10.37 MJ/kg of evaporated water. The effective moisture diffusivity ranged from 2.53×10^{-9} to 1.04×10^{-8} square meters per second. Predicting the moisture ratio using eight thin-layer drying models, analyzed by nonlinear regression, revealed that the Logarithmic model provided the best predictions at 50, 60, and 70 degrees Celsius and 0, 5, and 10 RPM, with higher R^2 and lower χ^2 and RMSE values compared to other models. Testing the feed mixture with commercial cricket feed showed that a 50% black soldier fly larvae mix resulted in an FCR of 2.25 and an ECI of 44.38%. Cost-reduction trials using Person's square method found that the second cost-reducing feed formula yields a final cricket weight yield of 99.89%, which is the highest when compared to other food recipes, and can reduce feed costs by up to 33.25%.

Keyword : black soldier fly, local ingredient feeding, drying, rotating tray drying, mathematical model the drying, Cricket



กิตติกรรมประกาศ

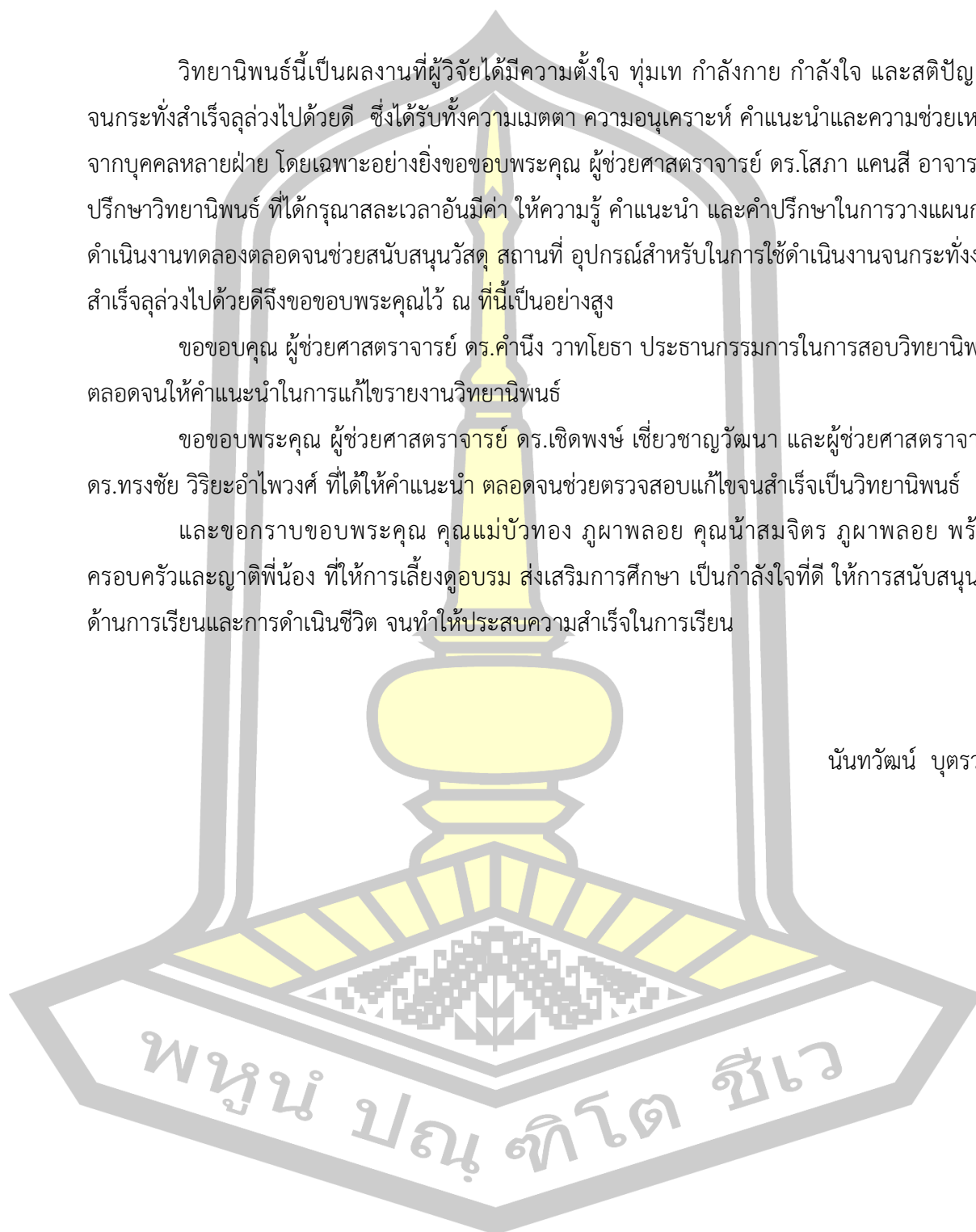
วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้มีความตั้งใจ พยายาม กำลังกาย กำลังใจ และสติปัญญา จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งได้รับทั้งความเมตตา ความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภา แคนสี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาในการวางแผนการดำเนินงานทดลองตลอดจนช่วยสนับสนุนวัสดุ สถานที่ อุปกรณ์สำหรับในการใช้ดำเนินงานจนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คำนิง วาทยธยา ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขจนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์

และขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่บัวทอง ภูผาพลอย คุณน้ำสมจิตร ภูผาพลอย พร้อมครอบครัวและญาติพี่น้อง ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา เป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนทั้งด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต จนทำให้ประสบความสำเร็จในการเรียน

นันทวัฒน์ บุตรวงศ์

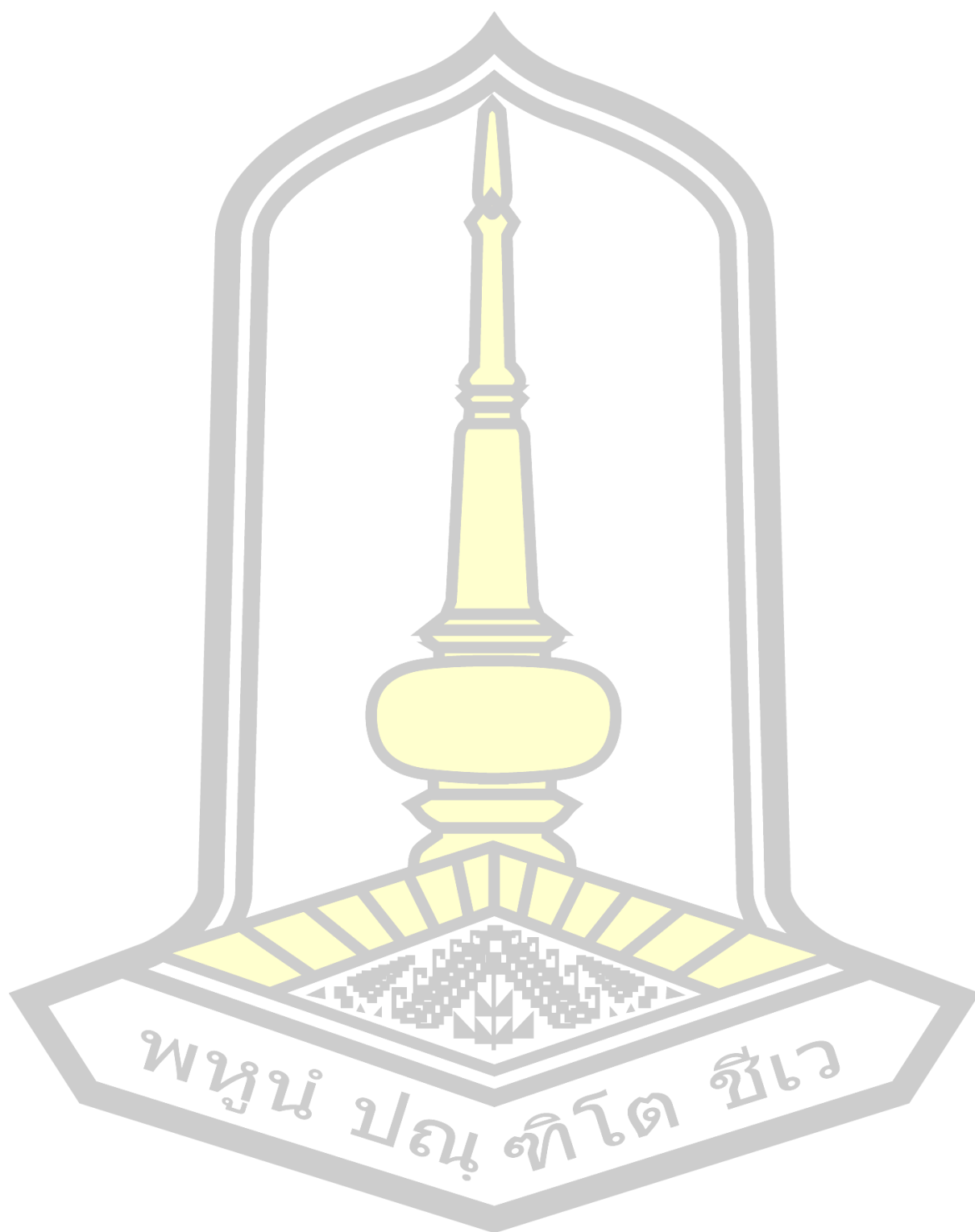


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ฒ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	4
บทที่ 2	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้อมูลทั่วไปของการเลี้ยงจิ้งหรีด.....	5
2.2 การเลี้ยงดูแล และการเก็บผลผลิต	7
2.3 ต้นทุน.....	9
2.4 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบแทน	11
2.5 ต้นทุนการเลี้ยงจิ้งหรีด	14
2.6 อาหารเลี้ยงสัตว์	17

2.7 พืชอาหารสำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด.....	18
2.8 แมลงวันลาย (Black soldier fly larvae; BSFL).....	24
2.9 การประกอบสูตรอาหารเบื้องต้น.....	33
2.10 การคำนวณสูตรอาหารอย่างง่ายสำหรับสัตว์เล็กและสัตว์ปีก.....	34
2.11 การตรวจสอบ และคำนวณอัตราการเติบโตของแมลง.....	36
2.12 การอบแห้ง (Drying).....	37
1) ช่วงอัตราการอบแห้งเริ่มต้น.....	57
2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่.....	57
3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง.....	58
1) ความชื้นมาตรฐานเปียก.....	61
2) ความชื้นมาตรฐานแห้ง.....	61
2.13 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	61
2.14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}).....	63
2.15 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง.....	64
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	64
บทที่ 3.....	67
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	67
3.1 การเตรียมหนอนแมลงวันลายในกระบวนการอบแห้ง.....	68
3.2 การตรวจสอบความชื้นหนอนแมลงวันลายก่อน-หลังการอบแห้งของหนอนแมลงวันลาย.....	69
3.3 การทดสอบการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน.....	72
3.4 การทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน.....	79
3.5 การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC).....	79

3.6 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน	80
3.7 ศึกษาการลดต้นทุนอาหารจิ้งหรีด โดยใช้หนอนแมลงวันลายและพืชอาหารสัตว์ท้องถิ่น.....	83
บทที่ 4	88
ผลการทดลอง	88
4.1 การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบภาดหมุน	88
4.2 การศึกษาปัจจัยการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน.....	90
4.3 พฤติกรรมการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน	95
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง.....	99
4.5 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	109
4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในกระบวนการอบแห้ง.....	112
4.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย	112
4.8 การทดสอบอาหารแต่ละประเภทในการเลี้ยงจิ้งหรีด	115
บทที่ 5	121
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	121
5.1 สรุปผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยลมร้อนแบบภาดหมุน.....	121
5.2 สรุปผลการทดลองการใช้อาหารลดต้นทุนในการเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์.....	123
5.3 ข้อเสนอแนะ	124
บรรณานุกรม.....	126
ภาคผนวก.....	131
ภาคผนวก ก.....	132
ภาคผนวก ข.....	146
ภาคผนวก ค.....	156
ภาคผนวก ง	165



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายการต้นทุนและรายได้ในการผลิตจิ้งหรีดต่อบ่อ	16
ตารางที่ 2 การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้ง (สั๊กมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)	43
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัดของฉนวน	52
ตารางที่ 4 ระดับค่าอุณหภูมิแอกทีวิตีและความสำคัญ (กอบพัชรกุล, 2550)	59
ตารางที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้ง	62
ตารางที่ 6 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง	78
ตารางที่ 7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล 8 แบบจำลอง	81
ตารางที่ 8 อัตราส่วนส่วนผสม สูตรการให้อาหารจิ้งหรีด	86
ตารางที่ 9 ข้อมูลการศึกษาปัจจัยความความเร็วมของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่อง อบแห้งแบบถาดหมุน	92
ตารางที่ 10 ข้อมูลการศึกษาปัจจัยความเร็วมรอบการหมุนถาดอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่อง อบแห้งแบบถาดหมุน	93
ตารางที่ 11 ข้อมูลการศึกษาปัจจัยความหนาของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้ง แบบถาดหมุน	94
ตารางที่ 12 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการ อบแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วมรอบในการหมุนถาดหมุน 0 รอบต่อนาที	100
ตารางที่ 13 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการ อบแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วมรอบในการหมุนถาดหมุน 5 รอบต่อนาที	100
ตารางที่ 14 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการ อบแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วมรอบในการหมุนถาดหมุน 10 รอบต่อนาที	101
ตารางที่ 15 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการ อบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วมรอบในการหมุนถาดหมุน 0 รอบต่อนาที	103

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 5 รอบต่อนาที	104
ตารางที่ 17 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 10 รอบต่อนาที	104
ตารางที่ 18 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 0 รอบต่อนาที	106
ตารางที่ 19 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 5 รอบต่อนาที	107
ตารางที่ 20 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 10 รอบต่อนาที	107
ตารางที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย	111
ตารางที่ 22 ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน	112
ตารางที่ 23 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน	114
ตารางที่ 24 ปริมาณสารอาหารที่จำเป็นสำหรับวัตถุดิบ	115
ตารางที่ 25 ข้อมูลส่วนผสมอาหารที่เหลือจากการให้อาหารจิ้งหรีด	116
ตารางที่ 26 ข้อมูลการทดลองการผสมผงหนอนแมลงวันลาย (BSF) กับอัตราส่วนอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์สำหรับจิ้งหรีด 500 กรัมต่อการทดลอง	117
ตารางที่ 27 อัตราส่วนส่วนผสม สูตรการให้อาหารจิ้งหรีด	118
ตารางที่ 28 การให้อาหารจิ้งหรีดระยะกลางปริมาณ 900 กรัมต่อบ่อจนเก็บเกี่ยวโดยใช้สูตรต่างกัน	120
ตารางที่ 29 การให้อาหารจิ้งหรีดตัวเต็มวัยปริมาณ 500 กรัมต่อบ่อจนเก็บเกี่ยวโดยใช้สูตรต่างกัน	120

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของจิ้งหรีด.....	6
ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงจุดคั่วหมูน	14
ภาพที่ 3 กากถั่วเหลือง (Soybean meal) และถั่วเหลือง	19
ภาพที่ 4 เมล็ดข้าวโพด (Core; Zea mays).....	21
ภาพที่ 5 รำข้าว (Rice bran)	22
ภาพที่ 6 กากมันหมักยีสต์	24
ภาพที่ 7 ลักษณะตัวเต็มวัยของหนอนแมลงวันลาย	24
ภาพที่ 8 ลักษณะไข่หนอนแมลงวันลายและตัวหนอนแมลงวันลาย	25
ภาพที่ 9 วงจรชีวิตของหนอนแมลงวันลาย	25
ภาพที่ 10 ลักษณะโรงเรือนในการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย	28
ภาพที่ 11 ระบบการวางถาดเพาะพ่อแม่พันธุ์.....	28
ภาพที่ 12 ที่วางไข่ของแม่พันธุ์	29
ภาพที่ 13 ระบบให้น้ำ ตั้งเวลาอัตโนมัติ.....	29
ภาพที่ 14 ถาดเลี้ยงหนอนในชั้นวาง.....	30
ภาพที่ 15 ระบบอนุบาลตัวอ่อนหนอนแมลงวันลาย	30
ภาพที่ 16 การล่อแมลงวันลายเพื่อการวางไข่	31
ภาพที่ 17 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และลดลง.....	38
ภาพที่ 18 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryers).....	46
ภาพที่ 19 เครื่องอบแห้งแบบท้อหมุน (Rotary dryers).....	47
ภาพที่ 20 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (Conveyer dryers).....	49
ภาพที่ 21 สเปกตรัมการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุ.....	55

ภาพที่ 22 การลวกหนอนแมลงวันลายก่อนการอบแห้ง	69
ภาพที่ 23 หนอนแมลงวันลาย	69
ภาพที่ 24 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven).....	70
ภาพที่ 25 ถ้วยอลูมิเนียม.....	70
ภาพที่ 26 เครื่องชั่งดิจิตอลละเอียด ± 0.001 (ยี่ห้อ Brifit).....	71
ภาพที่ 27 หนอนแมลงวันลายที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิขั้นต่ำ 80 °C.....	72
ภาพที่ 28 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน	72
ภาพที่ 29 ตู้อบความชื้น	73
ภาพที่ 30 เครื่องวัดอุณหภูมิ 12 ช่อง รุ่น BTM-4208SD	73
ภาพที่ 31 เครื่องชั่งน้ำหนัก OHAUS รุ่น PA4102	73
ภาพที่ 32 แอมมิเตอร์ไฟฟ้า (6IN1 Din Rail AC Monitor)	74
ภาพที่ 33 Anemometer UT363S Digital	74
ภาพที่ 34 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ชนิดท่อและครีป (Finned-tube).....	75
ภาพที่ 35 ระบบหมุนเวียนอากาศท่อลมขนาด 75 mm วัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) 2 ชุด	75
ภาพที่ 36 ช่องลมทั้งสองด้านของห้องอบ จำนวนทั้งสิ้น 12 ช่อง.....	76
ภาพที่ 37 โบว์เวอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm	76
ภาพที่ 38 ส่วนห้องอบและถาดอบแห้งแบบวงกลม	77
ภาพที่ 39 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบ	79
ภาพที่ 40 บ่อเลี้ยงจิ้งหรีด	84
ภาพที่ 41 แผงไข่.....	85
ภาพที่ 42 ถาดใส่อาหารและน้ำ.....	85
ภาพที่ 43 หิน.....	85
ภาพที่ 44 เครื่องชั่งดิจิตอล SUNFORD รุ่น FEH5000.....	86

ภาพที่ 45 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบ	89
ภาพที่ 46 อุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบ	89
ภาพที่ 47 ข้อมูลการทดสอบการกระจายตัวอุณหภูมิที่ความเร็วลม 4.5 เมตร/วินาที	90
ภาพที่ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับอัตราส่วนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วน (ปัจจัยความเร็วลม)	91
ภาพที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับอัตราส่วนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนปัจจัยการหมุนรอบ	92
ภาพที่ 50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับอัตราส่วนเวลา (ชั่วโมง) การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วน (ปัจจัยน้ำหนัก-ความหนาในการอบ).....	94
ภาพที่ 51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับอัตราส่วนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	95
ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (ชั่วโมง) ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	96
ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับอัตราส่วนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	97
ภาพที่ 54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (ชั่วโมง) ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	97
ภาพที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับอัตราส่วนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	98
ภาพที่ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (ชั่วโมง) ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบอัตราส่วนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	99
ภาพที่ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนรอบ 0 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Page	102
ภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนรอบ 5 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจำนวนประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างมากจนใกล้ถึง 7,000 ล้านคน ส่งผลให้ความต้องการบริโภคอาหารของประชากรเพิ่มขึ้น องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization : FAO) จึงมีแนวคิดในการรณรงค์ให้ใช้แมลง มาเป็นแหล่งอาหารสำหรับมนุษย์ เนื่องจากคุณสมบัติของแมลงที่มีช่วงอายุสั้น และสามารถเพิ่มจำนวนได้ครั้งละมากๆ (สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ และคณะ, 2555) จากการศึกษาแหล่งวัตถุดิบทางเลือกใหม่ ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ พบว่าแมลงหลายชนิดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และแร่ธาตุ ซึ่งสามารถเป็นอาหารทดแทนให้กับมนุษย์ได้ดี โดยเฉพาะจิ้งหรีด จากการศึกษาพบว่าเริ่มมีการเลี้ยงจิ้งหรีด ในปี พ.ศ. 2543 จากการอบรมของคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ให้แก่เจ้าหน้าที่ส่งเสริมเกษตรและโรงเรียนต่างๆ (ทัศนีย์ แจ่มจรรยา, 2555) ซึ่งในปี พ.ศ. 2561 มีเกษตรกรเลี้ยงจิ้งหรีดเป็นจำนวนมากถึง 20,887 ราย ผลผลิตรวม 2,747 ตัน มูลค่าการผลิต 274 ล้านบาท โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ อยู่ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2565) นอกจากนี้ ตลาดต่างประเทศ เช่น ญี่ปุ่น บรูไน ออสเตรเลีย ฮองกง เกาหลีและเยอรมัน ยังให้ความสนใจ แมลงแปรรูป (อารีย์ สมานมิตร, 2545) อีกทั้งจิ้งหรีดมีกรดไขมันที่เป็นประโยชน์ คือ กรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิก ส่งผลให้ระดับคอเลสเตอรอลใน LDL ที่ถูกจัดว่าเป็นไขมันไม่ดีในกระแสเลือด แต่ไม่ทำให้ไขมันดี HDL ลดลง จึงช่วยยับยั้งการเกิดโรคหัวใจ โรคความดันโลหิตสูง และโรคเบาหวาน นอกจากนี้ ยังสามารถนำมาเป็นอาหารสัตว์อื่นๆ เช่น นก ปลา กบ เป็นต้น (พิสุทธิ เอกอำนาจ, 2556) จากปริมาณความต้องการจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การเลี้ยงจิ้งหรีดจึงมีการจัดการเป็นระบบมากขึ้น และมีการนำอาหารสัตว์ปีกสำเร็จรูปมาใช้เป็นอาหารหลัก ส่งผลให้ต้นทุนการเลี้ยงจิ้งหรีดสูงขึ้น (สุภาวดี แหยมคง และคณะ, 2566) ซึ่งพบว่าต้นทุนทั้งในการเลี้ยงโดยใช้อาหารสัตว์ปีกสำเร็จรูป สูงถึงร้อยละ 64.02 ของต้นทุนทั้งหมด (ประทุมพร คำภาสุข และเยาวรัตน์ ศรีวรานันท์, 2557) และข้อมูลจากกรมสำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตรพบว่าพบว่าต้นทุนการผลิตระยะสั้น (ช่วงเริ่มกิจการ) ต้นทุนคง ประกอบด้วยโรงเรือนและวัสดุเพาะเลี้ยง และต้นทุนแปรผัน ประกอบด้วย พันธุ์ไข่ ภาชนะอาหาร วัสดุหีบห่อค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับต้นทุนในส่วน of อาหารในการเลี้ยงจิ้งหรีดมีค่าใช้จ่ายคิดเป็นเพียงร้อยละ 37 ของต้นทุนการผลิตจิ้งหรีดทั้งหมด

แต่เมื่อคิดในระยะยาว(ช่วงดำเนินการ) พบว่าต้นทุนการเลี้ยงจิ้งหรีดในส่วนของอาหารอยู่ที่ร้อยละ 86 ของต้นทุนทั้งหมด (ธิมาภรณ์ จันทร์สม, 2563)

จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับอาหารลดต้นทุนที่มีโปรตีนสูงเนื่องจากระดับโปรตีนที่ 15% เป็นระดับโปรตีนที่สามารถทำให้จิ้งหรีดเจริญเติบโตได้ (ทัศนีย์ แจ่มจรรยา, และชาญชัย ถาวรอนุกุลกิจ, 2548) และมีงานวิจัยเกี่ยวกับการผสมสูตรอาหารจากวัตถุดิบ คือ กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว เมล็ดข้าวโพด รำอ่อน มันเส้น และใบมันสำปะหลัง โดยมีอาหารไก่สำเร็จรูปโปรตีน 21% เป็นสูตรเปรียบเทียบ เลี้ยงจิ้งหรีด 2 รุ่นต่อเนื่องกัน พบว่าอาหารผสมด้วยใบมันสำปะหลัง 25% ได้น้ำหนักจิ้งหรีดเฉลี่ยลดลงมาจากอาหารไก่สำเร็จรูป โดยคิดเป็นต้นทุนค่าอาหารเฉลี่ย อยู่ที่ 22.74 บาท/กิโลกรัม และรุ่นที่ 2 เลี้ยงด้วยอาหารทั้ง 4 สูตร พบว่าน้ำหนักจิ้งหรีดรวมเฉลี่ยที่ได้อยู่ที่ 1,691-1,845 กรัม/บ่อ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันของอาหารทั้ง 4 สูตร โดยต้นทุนค่าอาหารเฉลี่ยทั้ง 4 สูตรอยู่ที่ 25-30 บาท/กิโลกรัม(สุกฤตา อนุตระกูลชัย และคณะ, 2557) และจากงานวิจัยชนิดอาหารต่อการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดพบว่า การเจริญเติบโตของจิ้งหรีดมีอัตราและระยะเวลาการเจริญเติบโตไม่เท่ากัน ทำให้จิ้งหรีดมีความยาวส่วนท้อง และความยาวจากหัวจรดปลายส่วนท้อง รวมถึงน้ำหนักของจิ้งหรีดมีความแตกต่างกัน (อินทัย วิงสระน้อย และคณะ 2556) ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่อยากจะศึกษาอาหารลดต้นทุนชนิดอื่นเพื่อเป็นทางเลือกให้เกษตรกรเลี้ยงจิ้งหรีดโดยต้องมีสารอาหารประเภทโปรตีนที่สูงกว่า 15% และมีความสนใจในการคัดแยกขนาดจิ้งหรีดจากการเก็บผลผลิตเพื่อเพิ่มกำไรในการซื้อขายจิ้งหรีดให้แก่เกษตรกร

ผู้วิจัยได้คิดทดลองนำหนอนแมลงวันลายมาอบแห้งและแปรรูปเป็นแหล่งอาหารทางเลือกใหม่สำหรับลดต้นทุนในการเลี้ยงจิ้งหรีดเนื่องจากมีคุณค่าทางอาหารสูงมีโปรตีน 42% , ไขมัน 35% , พลังงาน 2,900 กิโล แคลลอรี่ต่อกิโลกรัม กรดอะมิโน และธาตุอาหารอื่นๆ (Sheppard, Tomberlin, Joyce, Kiser, & Sumner, 2002) ซึ่งในตัวอ่อนของแมลงวันลายมี ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว (SFA) ค่อนข้างต่ำ (Ghosh, Lee, Jung, & Meyer-Rochow, 2017; Ravzanaadii, Kim, Choi, Hong, & Kim, 2012) โปรตีนที่พบมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณโปรตีนที่พบในเนื้อสุกร คือ 43.2% ระยะก่อนเขาดักแด่ (prepupae) ตัวหนอนแมลงวันลายจะออกมาจากอาหารเพื่อเขาดักแด่ทำให้ยากต่อการเก็บตัวหนอนมาทดลองเป็นอาหารเสริมเลี้ยงสัตว์ และจากการใช้หนอนแมลงวันลายแห้งเพื่อนำไปเลี้ยงลูกไก่พบว่าลูกไก่ที่เลี้ยงด้วยอาหารปกติเสริมด้วยหนอนแห้งของแมลงวันลายน้ำหนักตัวของลูกไก่เพิ่มขึ้น 96% มากกว่าลูกไก่ที่เลี้ยงด้วยถั่วเหลืองผสมไขมัน (Newton, Sheppard, Watson, Burtle, & Dove, 2005) เมื่อนำไปเลี้ยงปลากดหลวง (Ictalurus punctatus) พบว่ามีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับอาหารปลาปกติ (Bondariand Sheppard , 1981) และ จากการสืบค้นงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งพบว่า การอบแห้งหลากหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ได้ และเป็นที่ยอมรับทั้งการอบแห้งด้วย

เครื่องอบแห้งลมร้อน เนื่องจากการติดตั้งง่าย สามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และการกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ช่วยให้ประหยัดพลังงานและลดระยะเวลาในการอบ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการเลี้ยงจิ้งหรีดมีต้นทุนสูงซึ่งต้นทุนส่วนใหญ่เป็นค่าอาหารและการเลี้ยงจิ้งหรีดนั้นต้องใช้อาหารที่มีปริมาณโปรตีนสูงเนื่องจากจิ้งหรีดเป็นแมลงที่ต้องการโปรตีนมากถึง 15% ในการเจริญเติบโต ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำหนอนแมลงวันลายมาเป็นแหล่งอาหารทางเลือกใหม่เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 42% อีกทั้งยังมีวงจรชีวิตสั้นเลี้ยงง่ายโตเร็ว มีต้นทุนในการเลี้ยงต่ำ เหมาะจะนำมาเป็นแหล่งอาหารลดต้นทุนให้กับจิ้งหรีด อีกทั้งมีความสนใจที่จะศึกษาจนศาสตร์การอบแห้งหนอนแมลงวันลาย และวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 การอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

- 1) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน
- 2) ศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจากการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน
- 3) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

1.2.2 การลดต้นทุนในการเลี้ยงจิ้งหรีดจากการนำหนอนแมลงวันลายและพืชอาหารสัตว์ในท้องถิ่นมาเป็นแหล่งอาหาร

- 1) ศึกษาการนำหนอนแมลงวันลายและพืชอาหารสัตว์มาใช้ในการเลี้ยงจิ้งหรีด และใช้ในการผสมสูตรอาหารลดต้นทุน
- 2) ศึกษาผลผลิตจิ้งหรีดจากการเลี้ยงด้วยสูตรอาหารลดต้นทุนเปรียบเทียบกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การทดสอบการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย

- 1) หนอนแมลงวันลายที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้ง ใช้ระยะหนอนดักแต่อายุ 10-16 วัน ก่อนเข้าสู่ระยะตัวเต็มวัย
- 2) ความเร็วลมของลมร้อนเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที
- 3) อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

4) ความเร็วรอบในการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที

1.3.2 การทดสอบอาหารจิ้งหรีดจากหนอนแมลงวันลายอบแห้งบดผสมพืชอาหาร

1) จิ้งหรีดพันธุ์ทองดำ (*Gryllus bimaculatus*) และจิ้งหรีดพันธุ์ทองแดงลาย (*Acheta domestica*) อายุ 21 วัน

2) บ่อทดลองการเลี้ยงจิ้งหรีด ขนาด $1.2 \times 0.8 \times 0.6$ เมตร

3) น้ำหนักจิ้งหรีดที่ใช้ในการทดลอง 900 กรัมต่อบ่อตัวอย่าง และ 500 กรัมต่อดัวอย่าง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลการอบแห้งของหนอนแมลงวันลายเพื่อนำไปใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงจิ้งหรีด

1.4.2 สามารถเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรหรือผู้ประกอบการในการลดต้นทุนอาหารเลี้ยงจิ้งหรีด

1.4.3 ได้สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนแบบถาดหมุน

1.4.4 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนแบบถาดหมุน

1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ศูนย์เรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงบ้านดอนมัน ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของการเลี้ยงจิ้งหรีด

2.1.1 จิ้งหรีด

จากข้อมูลกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2564) คู่มือการเลี้ยงจิ้งหรีดฉบับประชาชน จิ้งหรีด (cricket) เป็นแมลงปากกัด มีตารวม หวดยาว ขาคู่หลังมีขนาดใหญ่ แข็งแรง กระโดดเก่งมีลักษณะข้อปล้องเป็นที่รู้จักของมนุษย์ และนำมาบริโภคเนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (โปรตีน 12.9% ไขมัน 5.5% แคลเซียม 758 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และธาตุเหล็ก 95 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) จิ้งหรีดจึงจัดเป็นอาหารโปรตีน ทางเลือกสำหรับมนุษย์ อาหารสัตว์ หรือวัตถุดิบอาหารสัตว์ได้ วงจรชีวิตของจิ้งหรีดประกอบด้วย จิ้งหรีดระยะไข่ ระยะตัวอ่อน ระยะตัวเต็มวัย ผสมพันธุ์ และวางไข่ มีอายุตลอดช่วงชีวิตอยู่ที่ประมาณ 90-120 วัน โดยจิ้งหรีดแต่ละระยะจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป การเจริญเติบโตของจิ้งหรีด ใช้เวลาตั้งแต่ไข่ จนถึงตัวโตเต็มวัย ประมาณ 45-60 วัน (ในฤดูหนาว จิ้งหรีดจะโตช้ากว่าปกติ) รวมระยะเวลาการลอกคราบ ถึง 7 ครั้ง (วัชรพร เลื่อมใส และสุนทร นาดี, 2564)



สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดและการให้ผลผลิต อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส จิ้งหรีดจะสามารถกินได้ วางไข่ และเพิ่มประชากรได้อย่างเต็มที่ (ถ้าอุณหภูมิต่ำจิ้งหรีดจะไม่สามารถผสมพันธุ์และวางไข่ได้) พื้นที่มีร่มเงา ไม่ตากแดด ตากฝน (อากาศร้อน ฝนตก ชุกจะไม่ผสมพันธุ์และวางไข่) น้ำ ต้องเป็นน้ำสะอาด (น้ำไม่สะอาดทำให้เกิดโรคทางเดินอาหารได้ง่าย) ดิน สำหรับการวางไข่ควรเป็นดินร่วนปนทราย หรือแกลบเพื่อให้จิ้งหรีดแทงเข็มวางไข่ในดินได้

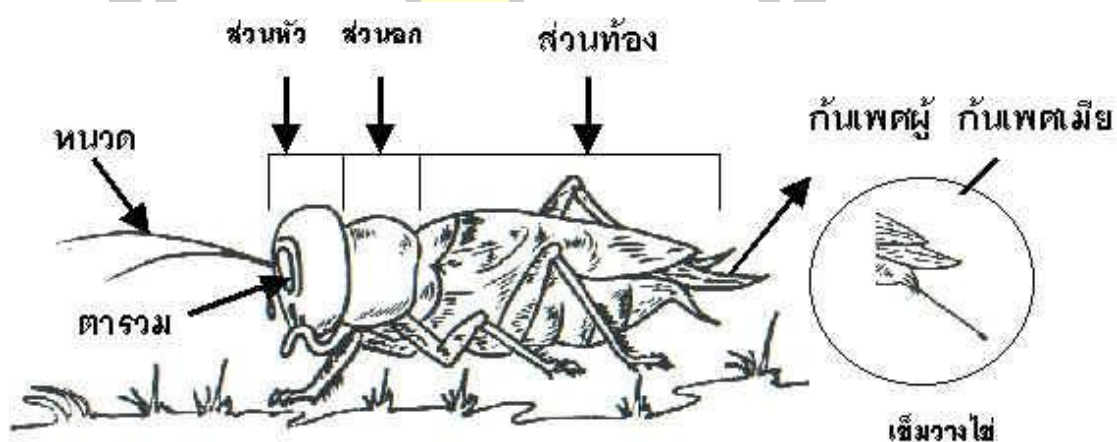
2.1.2 ลักษณะทั่วไปของจิ้งหรีด

จิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีปล้อง ห่อหุ้มร่างกายด้วยเปลือกที่แข็งแรง ประกอบด้วย 3 ส่วน แยกกัน คือ ส่วนหัว ส่วนนอก ส่วนท้อง แยกกันอย่างชัดเจน (ณัฐเสกสรรค์ สร้อยทองดี, 2562) แสดงดังภาพที่ 1

ส่วนหัว ประกอบด้วยตาราม 2 ตา มีปากแบบกัดกิน หนวด 2 เส้นขนาดยาวเท่ากับลำตัวหรืออาจยาวกว่า ลักษณะเป็นข้อปล้องกว้างเท่าๆ กัน และมีคอเป็นส่วนเชื่อมกับบอออกโดยกล้ามเนื้อเพื่อใช้ในการเคลื่อนไหว

ส่วนนอก ประกอบด้วย 3 ปล้อง แต่ละปล้องมีขา 1 คู่ คือ คู่หน้า คู่กลาง คู่หลัง โดยที่คู่หลังเป็นขาที่มีหนามและแข็งแรงใช้ในการกระโดด ด้านบนของปล้องที่ 2 และ 3 มีปีกคู่หน้า และปลีกคู่หลัง ในเพศผู้ปีกคู่หน้ามีลายหยักใช้เป็นตัวอวัยวะทำเสียงส่ง ในเพศเมียปีกเรียบไม่สามารถส่งเสียงได้

ส่วนท้อง ประกอบด้วยปล้อง 11 ปล้องในจิ้งหรีดเต็มวัย โดยที่ปล้องที่ 11 มีขนาดเล็กสังเกตได้ยากมีแพนหาง 1 คู่ ในเพศเมียมีอวัยวะวางไข่ยึดยาวคล้ายเข็มระหว่างแพนหาง ซึ่งเป็นจุดสังเกตในการแยกเพศจิ้งหรีด และด้านข้อของแต่ละปล้องมีรูหายใจปล้องละ 1 คู่



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของจิ้งหรีด

ที่มา: (sirinradnp.wordpress.com/ส่วนประกอบของจิ้งหรีด, 2566)

2.1.3 สายพันธุ์จิ้งหรีดในการเพาะเลี้ยง

ในประเทศไทยมีจิ้งหรีดหลากหลายสายพันธุ์แต่มี 4 สายพันธุ์ที่นิยมเลี้ยงกัน ดังนี้

1) จิ้งโกร่ง มีชื่อที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่น จิโปม จิ้งกุ่ม จินาย เป็นต้น จิ้งโกร่งเป็นจิ้งหรีดขนาดใหญ่ ลำตัวทุกส่วนมีสีน้ำตาล ส่วนท้องมีสีครีม และมีสีเหลืองในส่วนบนของคู่ขาหลัง เมื่อโตเต็มวัยลำตัวจะกว้าง 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.5-4 เซนติเมตร มีหนวดยาว มีพฤติกรรม

การขุดรูตามพื้นที่ดินร่วนปนทราย เพื่อใช้ในการหลบภัย และกักตุนอาหาร ลึกประมาณ 20-30 เซนติเมตร และยาวประมาณ 30-50 เซนติเมตร กลางวันจะปิดปากรู กลางคืนออกหากินและส่งเสียงร้อง

2) จิ้งหรีดทองคำ เป็นจิ้งหรีดขนาดกลาง บางพื้นที่เรียก จิโหล่น ลำตัวและปีกมีสีดำ หรือน้ำตาลปนดำทั้งตัว โตเต็มวัยลำตัวกว้างประมาณ 0.6-0.7 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2.8-3.0 เซนติเมตร มีหนวดที่ยาว มีสีที่แตกต่างกันในตัวผู้และตัวเมีย ตัวผู้ส่วนหัว และส่วนอกมีสีดำ ปีกมีสีน้ำตาลเหลืองเล็กน้อย และมีสีเหลืองโดยเฉพาะที่ปีก ส่วนตัวเมีย ส่วนหัวและอกมีสีดำสนิท โคนปีกมีแต้มสีเหลือง 2 จุด แต่ที่ปลายปีกคู่หลัง ของตัวผู้และตัวเมียยืดยาวมากกว่าลำตัว มีพฤติกรรมชอบอาศัยตามกองไม้ กองใบไม้ ร่องดิน ออกหากินในเวลากลางคืน และไม่ขุดรูอาศัย

3) จิ้งหรีดทองแดง เป็นจิ้งหรีดขนาดกลาง เมื่อตัวโตเต็มวัยลำตัวกว้างประมาณ 0.5-0.6 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2.5-2.8 เซนติเมตร ลำตัวทุกส่วนมีสีน้ำตาลเข้ม บริเวณหัวเหนือขอบตา มีแถบสีน้ำตาลเข้มรูปตัว V ตัวผู้มีสีลำตัวทุกส่วนเข้มกว่าตัวเมีย ด้านล่างท้องมีสีครีม เคลื่อนที่ได้รวดเร็ว มีพฤติกรรมชอบอาศัยตามกองไม้ กองใบไม้ ร่องดิน ออกหากินในเวลากลางคืน และไม่ขุดรูอยู่

4) จิ้งหรีดทองลาย ตัวผู้และตัวเมียมีอายุเต็มวัย 38-60 วัน เป็นจิ้งหรีดขนาดกลาง เมื่อโตเต็มวัยลำตัวกว้างประมาณ 0.4-0.55 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2.0-2.5 เซนติเมตร ตัวเมียลำตัวมีสีน้ำตาลปนเหลือง ลำตัวทุกส่วนมีสีเหลืองแกมน้ำตาล มีลักษณะสีเป็นลาย ปีกคู่หน้าเรียบมีสีน้ำตาล เป็นลายเส้นชัดเจน ปีกคลุมปลายท้องไม่มิด มีอวัยวะวางไข่คล้ายเข็มสีน้ำตาล ยาวประมาณ 1.2 เซนติเมตร ยาวกว่าแขนหางเล็กน้อย ในตัวผู้ลำตัวมีสีเข้มกว่าตัวเมีย และมีลายแต้มที่หัว ปลายท้องมีแขนหาง มีพฤติกรรม ชอบอาศัยตามกองไม้ กองใบไม้ ร่องดิน ออกหากินในเวลากลางคืนและไม่ขุดรูอาศัย

2.2 การเลี้ยงดูและ การเก็บผลผลิต

2.2.1 การเลี้ยงจิ้งหรีดวัยอ่อน

หลังจากบ่มไข่แล้ว เมื่อจิ้งหรีดเริ่มฟักตัวค่อยย้ายไปลงบ่อ เปิดปาก กระสอบที่ใช้บ่ม ปล่อยให้จิ้งหรีดไต่ออกมาจากกระสอบให้หมดจึงย้ายดินออก ลูกจิ้งหรีดช่วงนี้จะขนาดเล็กมาก คล้ายๆ มด ต้องดูแลให้ทั้งการให้น้ำและอาหาร การให้น้ำช่วงเป็นตัวอ่อน ควรใช้ฟองน้ำ หรือผ้าชุบน้ำให้ชุ่มแล้ววางในบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด ตัวอ่อนจิ้งหรีดจะมากูดกินน้ำที่ฟองน้ำ ไม่ควรให้น้ำโดยใส่ถ้วย จาน หรือถาดอาหารสูง เพราะจะทำให้จิ้งหรีดที่ตัวเล็กตกลงไปตายได้ หรือให้น้ำจิ้งหรีดได้ด้วยการ วางใบตองและสเปรย์ฉีดพ่นน้ำ ซึ่งจะเหมือนธรรมชาติ อีกทั้งการฉีดพ่นละอองน้ำ ยังช่วยให้จิ้งหรีด คลายร้อน ลดความเครียดของจิ้งหรีดได้ การให้อาหาร ช่วงระยะแรกเกิด จะให้อาหารผงละเอียด

เนื่องจากจิ้งหรีดตัวเล็ก อาหารที่ให้เป็นอาหารไก่อเล็กหรืออาหารสำเร็จรูปสำหรับจิ้งหรีดโดยเฉพาะ ควรมีโปรตีนอาหารอยู่ที่ 21% มีความน่ากิน ย่อยง่าย ดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้สูง ให้อาหารทีละน้อยๆ แต่ต้องมีพื้นที่ให้อาหารเพียงพอ เพื่อให้จิ้งหรีดกินอาหารได้ทั่วถึงกัน จิ้งหรีดจะมีขนาดตัวเท่ากัน

2.2.2 จิ้งหรีดวัยตัวอ่อน-โตเต็มวัย

เริ่มนำแผงไข่ที่เตรียมไว้ลงในบ่อ จิ้งหรีดช่วงนี้จะลอกคราบประมาณ 8 ระยะ ช่วงลอกคราบจิ้งหรีดจะอ่อนแอมากและกินกันเอง ดังนั้นต้องจัดเตรียมน้ำและอาหารให้เพียงพอ หรือเพิ่มหญ้าสด หรือหญ้าแห้งเพื่อเพิ่มพื้นที่หลบภัย ระยะนี้จะ ใช้เวลา 45-50 วัน การรอดชีวิตจากวัยอ่อนถึงตัวเต็มวัยอยู่ที่ 90% การให้น้ำในระยะที่จิ้งหรีดเริ่มโตสามารถให้น้ำโดยใช้ภาชนะก้นตื้นหรือจาน แล้ววางก้อนหินก้อนเล็กๆ ไว้ในจานเพื่อให้จิ้งหรีดเกาะกินน้ำได้ง่าย หรือใช้ท่อพีวีซี (PVC) เจาะรูด้วยผ้าที่รองเพื่อซับน้ำเพื่อจิ้งหรีดใช้กินได้ การให้อาหารให้อาหารจิ้งหรีดควรให้ทีละน้อย เวลาเช้า-เย็น เสริมหญ้าแห้ง หรือหญ้าสด หรือพืชอาหารที่ปลอดภัยสารพิษ เช่น ต้นอ่อนพืช หรือหญ้าสดทุกชนิด หญ้าขน หญ้าธูปี่ ผักตบชวา โดย 2 วัน ให้หญ้า 1 ครั้งๆ ละ 1 กำมือ โดยหญ้าเก่า หากแห้งไม่ต้องนำออก จะเป็นที่อาศัยของจิ้งหรีดต่อไป ทั้งนี้ควรให้น้อยๆ และบ่อยครั้ง ให้ในปริมาณที่กินหมดภายใน 2 วัน อาหารเสริมที่นิยมให้เพื่อเพิ่มโปรตีนกับจิ้งหรีด ทำให้ตัวโต น้ำหนักดี ส่วนมากแล้วจะให้ช่วงก่อนนำจิ้งหรีดออกขายประมาณ 1 สัปดาห์คือ พืช ผักต่าง ๆ เช่น พริก-พริกแดง พริกทอง ผักบุ้ง ผักโขม คะน้า กวางตุ้ง กัลฉ่ำ ใบมันสำปะหลัง เป็นต้น

2.2.3 การเลี้ยงจิ้งหรีดช่วงผสมพันธุ์วางไข่

เมื่อถึงช่วงผสมพันธุ์จิ้งหรีดจะเริ่มส่งเสียงร้อง จิ้งหรีดเพศเมียจะเริ่มวางไข่ภายใน 3-5 วัน หลังจากผสมพันธุ์จิ้งหรีดจะกระวนกระวายหาที่วางไข่ ให้นำถาดใส่ขี้เถ้าแกลบรดน้ำให้ชุ่มพอประมาณมาวาง จิ้งหรีดจะไข่ววี่วางไข่แทงลงไปบนดิน หลังจากนั้นนำถาดที่รองไข่ไปอบเพื่อเลี้ยง ขยายพันธุ์ หรือขายต่อไป ส่วนจิ้งหรีดสามารถจับขายได้ หรือจะเลี้ยงต่อเพื่อรองไข่อีก ประมาณ 3-5 รอบ โดยขั้นตอนการรองไข่มีดังนี้ ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อวัสดุรองไข่ เช่น แกลบ ก่อนใช้ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อภาชนะที่ใช้รองไข่ วัสดุรองไข่ ใช้แกลบเผา 60% + ทราย 30% + ขุยมะพร้าว 10% นำมาผสมเข้าด้วยกัน หรือใช้เฉพาะแกลบเผาทั้งหมดก็ได้ นำส่วนผสมดังกล่าวมาผสมกับน้ำ พอหมาด ให้มีความชุ่มชื้น (ป็นเป็นก้อนได้) เอาใส่ชั้นให้หนา 5-7 เซนติเมตร โดยไม่ต้องอัดให้แน่น หรืออาจจะใช้ดินสำเร็จรูปสำหรับให้จิ้งหรีดวางไข่ได้ วางภาชนะและวัสดุที่ใช้รองไข่ในบ่อเลี้ยง 6-8 ชั่วโมง (ทิ้งไว้ 1 คืน โดยประมาณ) ถ้าวางนานเกินกว่านี้จะทำให้อายุไข่จิ้งหรีดไม่เท่ากัน การเก็บรวบรวมจิ้งหรีดจากบ่อ เก็บจำหน่ายได้ทั้งระยะเลื้อยก็ และตัวเต็มวัย แต่ควรเก็บจิ้งหรีดให้หมดบ่อเพื่อสะดวกในการทำความสะดวก เตรียมบ่อสำหรับรุ่นถัดไป โดยมีขั้นตอนดังนี้

- งดการให้อาหาร 2-3 วัน ก่อนเก็บจิ้งหรีดออกจากบ่อ โดยการเอาอาหารออกจากบ่อเลี้ยง เพื่อป้องกันไม่ให้จิ้งหรีดมีกลิ่นตัว
- นำถาดน้ำออก เคาะแฉ่งไข่เพื่อขจัดมูลและฝุ่น แล้วนำกลับเข้าไปวางใหม่ด้านในของบ่อ จิ้งหรีดจะมาเกาะที่แฉ่งไข่
- เขย่าแฉ่งไข่ลงในกะละมังที่เจาะรูด้านล่างเพื่อแยกมูลจิ้งหรีดออก
- ใช้สวิงรูปสามเหลี่ยมที่ทำด้วยลวดหรือไม้แขวนเสื้อ สวมด้วยถุงพลาสติก ซ้อนเอาจิ้งหรีดที่เกาะผนังบ่อใส่ในกะละมัง
- ล้างจิ้งหรีดด้วยน้ำสะอาด 3-5 ครั้ง ต้มในน้ำเดือด 10 นาที
- บรรจุใส่ถุง แช่ตู้เย็นอุณหภูมิระหว่าง -15 ถึง -20 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการแปรรูป และจำหน่าย

2.3 ต้นทุน

ต้นทุน (Cost) หมายถึง มูลค่าของทรัพยากรที่สูญเสียไปเพื่อให้ได้สินค้าหรือบริการ โดยมูลค่านั้นจะต้องสามารถวัดได้เป็นหน่วยเงินตรา ซึ่งเป็นลักษณะของการลดลงในสินทรัพย์ หรือเพิ่มขึ้นในหนี้สิน ต้นทุนที่เกิดขึ้นอาจจะให้ประโยชน์ทั้งในปัจจุบันหรือในอนาคต เมื่อต้นทุนได้ที่เกิดขึ้นและกิจการที่ได้ใช้ประโยชน์ไป ทั้งสิ้นแล้ว ต้นทุนนั้นก็จะเป็น ค่าใช้จ่าย (Expenses) ดังนั้นค่าใช้จ่ายจึงหมายถึงต้นทุนที่ได้ให้ประโยชน์และกิจการที่ได้ประโยชน์ทั้งหมดไปแล้วในขณะนั้น และสำหรับต้นทุนกิจการสูญเสียไป แต่จะให้ประโยชน์แก่กิจการในอนาคตเรียกว่า สินทรัพย์ (Assets)

2.3.1 ประเภทต้นทุน

ต้นทุนในหนึ่งรายการสามารถจัดประเภท ได้มากกว่าหนึ่งประเภท ขึ้นอยู่กับเกณฑ์การพิจารณาและจัดประเภทตามความเหมาะสมของรายการต้นทุนนั้นๆ โดยสามารถจำแนกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ (ณัฐเสฏฐ์ สร้อยทองดี, 2562)

1) การจำแนกต้นทุนตามส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เช่น กระเป่า เสื้อผ้า รองเท้า ผลิตภัณฑ์ดังกล่าว จะใช้ปัจจัยเพื่อนำมาใช้ในการผลิต 3 ส่วนด้วยกัน คือ

ส่วนที่ 1 วัตถุดิบทางตรง หมายถึง ส่วนวัตถุดิบที่สำคัญในการประกอบสินค้าสำเร็จรูป จัดเป็นส่วนประกอบหลักของผลิตภัณฑ์ เช่น หนังสัตว์เพื่อใช้ทำรองเท้า ไม้เพื่อนำมาทำโต๊ะ ไม้ หรือเก้าอี้ไม้

ส่วนที่ 2 แรงงานทางตรง หมายถึง ค่าจ้างแรงงานของพนักงาน ผู้ปฏิบัติงานในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิต เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นสินค้าสำเร็จรูป เช่น พนักงานประกอบชิ้นส่วน พนักงานตัดเสื้อ

ส่วนที่ 3 ค่าใช้จ่ายในการผลิต หมายถึง ทรัพยากรอื่นๆ ที่นอกเหนือจากวัตถุดิบทางตรงและแรงงานทางตรง โดยทรัพยากรเหล่านี้จะเป็นส่วนช่วยสนับสนุนให้การผลิต แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

วัตถุดิบทางอ้อม ยกตัวอย่างเช่น การเช่าเล่มหนังสือ นอกจากกระดาษจะเป็นวัตถุดิบหลัก ยังจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบรอง เช่น กาว เชือก ด้าย วัตถุดิบอื่นต่างจะช่วยให้การผลิตหนังสือเป็นรูปเล่มสมบูรณ์

แรงงานทางอ้อม เป็นบุคคลหรือผู้ปฏิบัติงาน ที่มีความเกี่ยวข้อง ในการผลิต แต่ไม่ใช่ผู้ที่ทำการประกอบวัตถุดิบต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น พนักงานห้องเครื่อง พนักงานซ่อมบำรุง หัวหน้าควบคุมงาน

ค่าใช้จ่ายการผลิตอื่น เช่น ค่าใช้จ่ายภายในโรงงาน ค่าภาษี ค่าประกัน ค่าเสื่อม ค่าเช่า

2) การจำแนกต้นทุนตามพฤติกรรมต้นทุนที่สัมพันธ์กับการผลิตหรือการบริการ

เมื่อพิจารณารายการ ต้นทุนใดๆ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการผลิต การบริการ หรือการทำงาน ตามพฤติกรรมของต้นทุน สามารถจำแนกได้ 4 ประเภท ดังนี้

ต้นทุนผันแปร หมายถึง ต้นทุนที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตามปริมาณการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณการผลิต เช่น การการผลิตหนังสือจำนวนมากจำเป็นต้องใช้ กระดาษจำนวนมาก และจำเป็นต้องใช้แรงงานจำนวนมากขึ้นตามจำนวนการผลิตด้วยเช่นกัน

ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีจำนวนเท่าเดิมคงที่ตลอดการผลิต ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ แม้ว่าการผลิตจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เช่น ค่าเช่าของโรงงานในการผลิต ซึ่งไม่ว่าจะมี การผลิตหรือไม่หรือมีการผลิตมากน้อยเพียงใด ค่าเช่าของโรงงานยังคงเท่าเดิมสำหรับการเช่า นั้น ๆ นอกจากนี้ยังมี ค่าภาษีโรงเรือน ค่าเบี้ยประกันโรงงาน เป็นต้น

ต้นทุนผสม หรือต้นทุนกึ่งผันแปร หมายถึง ต้นทุนที่มีค่าใช้จ่ายขึ้นต่ำเท่าเดิม แต่อาจ มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นหากมีการผลิตหรือใช้บริการมากขึ้น เลยกำหนดของปริมาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้ เช่น ค่าสาธารณูปโภคพื้นฐาน ค่าน้ำค่าไฟ ค่าโทรศัพท์

ต้นทุนเป็นขั้น หรือต้นทุนกึ่งคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่จำเป็นต้องจ่ายคงที่อยู่ในระดับ หนึ่ง แต่หากจำเป็นต้องมีการผลิตเพิ่มมากขึ้น ก็จำเป็นต้องมีการจ่ายเงินเพื่อเป็นรองรับการผลิต ที่เพิ่มมากขึ้น เช่น คน 1 คนทำงานได้ 3 ชั่วโมง หากต้องใช้เวลาทำงานเพิ่มขึ้นเป็น 16 ชั่วโมง จึงจำเป็นต้องจ่ายเงินเพื่อรองรับการจ้างงานที่เพิ่ม

2.4 แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบแทน

2.4.1 การวิเคราะห์การลงทุนในโครงการ

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินเพื่อจัดลำดับความสำคัญในการตัดสินใจลงทุน รวมทั้งเพื่อให้การตัดสินใจลงทุนมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพนั้น ต้องอาศัยเครื่องมือทางการเงินเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โดยมีการจัดทำประมาณการกระแสเงินสดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตก่อน แล้วนำมาคำนวณผ่านเครื่องมือต่าง ๆ 4 วิธี (ณัฐเสกสรรค์ สร้อยทองดี, 2562) ดังนี้

1) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)

ระยะเวลาคืนทุน หมายถึง ระยะเวลาของการลงทุนที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากโครงการ เท่ากับ กระแสเงินสดจ่ายสุทธิ เป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และรวดเร็วเหมาะกับเมื่อเงินลงทุนจำนวนไม่ มาก คำนวณ โดย

ระยะเวลาคืนทุน = เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ - กระแสเงินสดรับสุทธิต่อปี สะสมไปเรื่อย ๆ จนเงินจ่ายลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการเท่ากับศูนย์

โดยทั่วไปเกณฑ์ตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุนที่คำนวณ ได้เปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ยอมรับได้ เช่น คืนทุนในระยะเวลา 3 ปีหรือ 5 ปี

2) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอด อายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน โดยใช้อัตราคิดลด (discount rate) ตัวใดตัวหนึ่งมาปรับ มูลค่าของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาให้มาอยู่ที่จุดเดียวกัน คำนวณจากสูตร

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I$$

$$\text{หรือ } NPV = \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+k)^n} - I$$

เมื่อ CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t

I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ

k คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ

n คือ อายุของโครงการ

เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้ของโครงการมีค่ามากกว่า 0 ก็ตัดสินใจลงทุนหรือยอมรับโครงการนั้น หากมูลค่าปัจจุบันสุทธิน้อยกว่า 0 หรือมีค่าเป็นลบ ก็ไม่ลงทุนในโครงการดังกล่าว เนื่องจากไม่คุ้มค่าที่จะลงทุน

3) อัตราผลตอบแทนคิดลด (Internal Rate of Return: IRR)

อัตราผลตอบแทนคิดลด คือ อัตราคิดลด (discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการเท่ากับเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ อัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับศูนย์ เป็นอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยต่อปีที่ผู้ลงทุนจะได้รับจากการลงทุนตลอดอายุโครงการนั่นเอง ในทางปฏิบัติ IRR นิยมนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินโครงการอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธี IRR นี้มีการแสดงค่าผลตอบแทนเป็นร้อยละ ซึ่งทำให้เข้าใจง่ายและมีความสะดวกในการเปรียบเทียบระหว่างโครงการต่าง ๆ คำนวณจากสูตร

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I$$

เมื่อ $NPV = 0$

$$\text{จะได้ } I = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t}$$

เมื่อ k คือ อัตราผลตอบแทนคิดลด หรือ IRR นั้นเอง

I คือ เงินสดจ่ายลงทุนโครงการ

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิ

CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t

n คือ อายุของโครงการ

สำหรับเกณฑ์การตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจะพิจารณา ดังนี้

หาก $IRR > r$ ก็ตัดสินใจลงทุน

หาก $IRR < r$ ก็ตัดสินใจไม่ลงทุน

โดย r คือ ต้นทุนของเงินทุน(cost of capital) ของโครงการ

4) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio)

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน คือ อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดที่ได้รับตลอดอายุโครงการกับเงินลงทุนเริ่มแรกของโครงการนั้น เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง ผลตอบแทนในรูปของกระแสรายได้ที่เกิดขึ้นในอนาคตตลอดอายุโครงการที่มีการปรับค่าให้เป็น มูลค่าปัจจุบันแล้วกับเงินลงทุนเริ่มแรกของโครงการที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

$$B/C \text{ ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+k)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+k)^t}}$$

เมื่อ B_t คือ กระแสเงินสดรับ ณ ปีที่ t
 C_t คือ กระแสเงินสดจ่าย ณ ปีที่ t
 k คือ อัตราคิดลด
 n คือ อายุของโครงการ

ก) อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน (Return on Investment หรือ ROI) หรือ อัตราผลตอบแทนจากสินทรัพย์ (Return on Assets: ROA) เป็นการประเมินที่นำผลกำไรที่ได้จากการดำเนินงานหลังภาษีเทียบกับ สินทรัพย์หรือเงินลงทุนที่ใช้ในการดำเนินงาน หากมีอัตราส่วนที่สูง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอุตสาหกรรม แสดงว่ากิจการมีประสิทธิภาพในนำเงินลงทุนมาก่อให้เกิดกำไรสูง สูตรการคำนวณ คือ

$$\text{อัตราผลตอบแทนจากเงินลงทุน(ROI)} = \frac{\text{กำไรสุทธิ}}{\text{เงินลงทุน}}$$

ข) อัตราผลตอบแทนจากสินทรัพย์รวม (Return on Assets หรือ ROA) ในหมวดของการ วัดประสิทธิภาพในการบริหารงานของฝ่ายบริหารเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าอัตราความสามารถในการหา กำไร (Earning Power) เป็นการวัดการใช้ประโยชน์จากสินทรัพย์ที่มีอยู่ว่าใช้ได้มากน้อยเพียงใด หาก มีอัตราส่วนที่สูง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอุตสาหกรรม แสดงว่ากิจการมีประสิทธิภาพในการใช้สินทรัพย์ที่สูง ซึ่งคำนวณจากสูตรดังนี้ (เพชร ชุมทรัพย์, 2548)

$$\text{อัตราผลตอบแทนจากสินทรัพย์รวม (ROA)} = \frac{\text{กำไรสุทธิ}}{\text{ทรัพย์สินรวม}}$$

ค) อัตราผลตอบแทนส่วนของผู้ถือหุ้น (ROE) เน้นการวิเคราะห์เฉพาะเงินทุนส่วนของผู้ถือหุ้นสามัญ หากมีอัตราส่วนที่สูง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอุตสาหกรรม แสดงว่ากิจการมีประสิทธิภาพใน การบริหารและก่อให้เกิดกำไรที่สูง ซึ่งคำนวณจากสูตรดังนี้ (เพชรี ชุมทรัพย์, 2548)

$$\text{อัตราผลตอบแทนส่วนของผู้ถือหุ้น (ROE)} = \frac{\text{กำไรสุทธิ}}{\text{ส่วนผู้ถือหุ้น}}$$

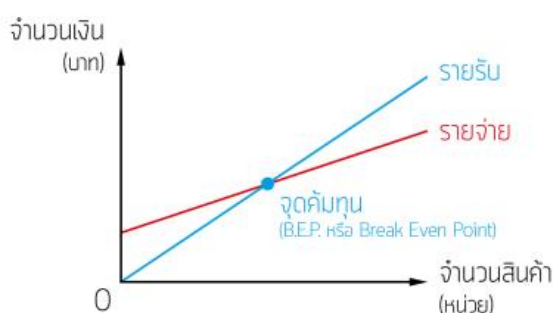
2.4.2 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุน หมายถึง การดำเนินงานของกิจการที่ก่อให้เกิดไม่กำไรและขาดทุน หรือกิจการมีกำไรรวมเท่ากับต้นทุนที่ลงทุนไป (สมนึก เอื้อจิระพงษ์พันธ์, 2551) นิยมใช้ 2 วิธีในการคำนวณคือ

1) การใช้กำไรส่วนเกิน เป็นวิธีที่คำนวณหาจุดคุ้มทุนได้ง่ายคำนวณจาก

$$\text{จุดคุ้มทุน (หน่วย)} = \frac{\text{ต้นทุนคงที่}}{\text{กำไรส่วนเกินต่อหน่วย}}$$

2) การใช้แผนภาพ หรือ แผนภาพจุดคุ้มทุน ซึ่งแสดงข้อมูลยอดขาย ต้นทุนผันแปร ต้นทุนคงที่ ในแกนตั้ง และแสดงจำนวนหน่วยในแกนนอน จุดที่เส้นทั้งสองตัดกัน คือ จุดคุ้มทุน



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงจุดคุ้มทุน

ที่มา: (thaifranchisecenter.com/calculator/break-even-analysis.php, 2566)

2.5 ต้นทุนการเลี้ยงจิ้งหรีด

โรงเรือน ในการเลี้ยงจิ้งหรีด ไม่มีรูปแบบเฉพาะตัว ส่วนใหญ่ จะดัดแปลงบริเวณภายในที่พักอาศัย แต่หาโครงเรือนสำหรับการเลี้ยงแบบเฉพาะนั้น อาจเป็นโรงเรือนในรูปแบบต่างๆ ดูควย โดยมีค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับขนาด โดยโรงเรือนควรมีความทนทานใช้งบประมาณไม่สูง สามารถระบาย

ความร้อนและถ่ายเทอากาศได้ดีป้องกันแดดและฝนได้ดี(อิริชาต และ ทองพูล, 2557) และมีอุปกรณ์ภายในสำหรับการเพาะเลี้ยง ดังนี้

1) โรงเรือนในการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีด ไม่มีรูปแบบเฉพาะตัว ส่วนใหญ่เป็นการดัดแปลงบริเวณภายในที่พักอาศัย เช่น ชายคาบ้าน แต่หากโรงเรือน การเพาะเลี้ยงแบบเฉพาะนั้น อาจเป็นโรงเรือนในรูปแบบต่างๆ โดยมีค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับขนาด โดยโรงเรือนนั้นควรมีความทนทานใช้ประมาณไม่สูงสามารถระบายความร้อนและอากาศถ่ายเทได้ดี ป้องกันแดดและฝนได้ดี (อิริชาต ศรีสะอาด และทองพูล วรรณโพธิ์, 2557)

2) บ่อเพาะเลี้ยง เช่น บ่อปูนซีเมนต์ ถัง กล้องตาข่าย กล้องไม้อัด กะละมังปากกว้าง หรือวัสดุอื่นที่ประยุกต์ขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์ในการเลี้ยง โดยเฉพาะซึ่งควรมีข้อคำนึง คือ ราคาถูก แข็งแรงทนทาน เหมาะสมกับการจัดการ ราคาตั้งแต่ 100 บาท สำหรับบ่อปูนกลมขนาดต่างๆ และสูงถึง 1,300 บาท หากเป็นการสั่งทำ กล้องขึ้นมา โดยขนาดกล้องมีความกว้าง 1.2 เมตร X ความยาว 2.4 เมตร X และความสูง 0.9 เมตร

3) เทปกาวผิวลื่น ใช้เทปกาวผิวลื่นกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร โดยติดด้านในรอบขอบภาชนะเพาะเลี้ยงต่ำลงมาประมาณ 5 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้จิ้งหรีดปีนออกไป นอกภาชนะเพาะเลี้ยง

4) ตาข่ายพลาสติก ใช้ตาข่ายพลาสติกขนาดใหญ่ กว่าภาชนะเพาะเลี้ยงประมาณ 30-40 เซนติเมตร คลุมปากบ่อ เพื่อป้องกันศัตรูของจิ้งหรีด เช่น นก หนู แมลงชนิดอื่น ที่จะเข้ามาทำลายและแย่งอาหารของจิ้งหรีดที่เพาะเลี้ยง ราคาประมาณ 200 บาท และสูงขึ้นตามขนาด

5) วัสดุหลบซ่อน ที่นิยมใช้คือ แฝงวางไข่ที่ทำจากกระดากัด มีไว้สำหรับให้จิ้งหรีดหลบซ่อนตัวหลังการลอกคราบ มีการจำหน่าย ทั้งแผงไข่ใหม่หรือแผงไข่ที่ใช้แล้ว ราคาแผงละ 1-2.5 บาท จำนวนในการใช้ขึ้นอยู่กับขนาดของบ่อเพาะเลี้ยง

6) ที่ให้อาหารและน้ำ อาจใช้เป็นถาดพลาสติกขนาดต่างๆ ที่ทำความสะอาดง่ายและขูดพลาสติกเจาะรู หรือชายผ้าที่ซับน้ำได้ดี แสงในน้ำให้มีลักษณะคล้ายตะเกียงน้ำมัน เพื่อให้จิ้งหรีดมากินน้ำที่บริเวณด้านบนของภาชนะ

7) วัสดุรองพื้น วัสดุที่นิยมใช้กันคือ แกลบดำ ขायเพื่อดูดซับความชื้นภายในภาชนะเพาะเลี้ยง และยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดเชื้อรา ซึ่งจะสร้างความเสียหายและก่อให้เกิดโรคได้ ราคา 50-60 บาท

8) ภาชนะวางไข่ ภาชนะที่นิยมใช้ คือ ขันพลาสติก กล้องโฟม ถาดพลาสติก โดยภายในบรรจุแกลบดำ เพื่อเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับวางไข่ ราคา 10-20 บาทต่อใบ

9) อาหาร อาหารของจังหวัด แบ่งออกเป็นอาหารหลัก อาจใช้อาหารไก่เล็ก หรืออาหาร จังหวัดสำเร็จรูป ซึ่งราคาอยู่ที่ 450-600 บาทต่อกระสอบ (30 กิโลกรัม) เนื่องจากมีสารอาหาร เหมาะสม ต่อการเจริญเติบโต อาหารรอง เช่น พืชผัก วัชพืช ซึ่งจะช่วยให้โตไว แข็งแรงและล่างให้ได้ มาก

รวมต้นทุน เริ่มต้น ราคาโรงเรือน 20,000-50,000 บาท และปริมาณการเพาะเลี้ยงต่อ 1 บ่อ ของอุปกรณ์ภายใน ประมาณ 1,500-2,000 บาท และค่าอาหารประมาณ 750 บาท (1.5 กระสอบ)

ตารางที่ 1 รายการต้นทุนและรายได้ในการผลิตจังหวัดต่อบ่อ

รายการ	ต้นทุนการผลิต ต่อบ่อโดยเฉลี่ย(บาท)		รายได้ต่อบ่อ(1.2X2.4X0.70 เมตร) โดยเฉลี่ย(บาท)	
	ระยะสั้น (ช่วงเริ่มกิจการ)	ระยะยาว (ช่วงดำเนิน กิจการ)	ขายปลีก	ขายส่ง
พ่อพันธุ์ และแม่พันธุ์จังหวัด	200	0	890	1,200
วัสดุในการเลี้ยง	248	36		
อาหารเลี้ยง	225	225		
รวม	673	261	890	1,200

ที่มา: (Hanboonsong et al,2013; กรมสำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร,2559)

โดยสรุปจากตารางที่รายการต้นทุนและรายได้ผลิตต่อบ่อพบว่าต้นทุนการผลิตระยะสั้น (ช่วงเริ่มกิจการ) ต้นทุนคง ประกอบด้วยโรงเรือนและวัสดุเพาะเลี้ยง และต้นทุนแปรผัน ประกอบด้วย พันธุ์ไข่ ถาดอาหาร วัสดุหลบซ่อนค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับต้นทุนในส่วนของการเลี้ยง จังหวัดมีค่าใช้จ่ายคิดเป็นเพียงร้อยละ 37 ของต้นทุนการผลิตจังหวัดทั้งหมด แต่เมื่อคิดในระยะยาว (ช่วงดำเนินการกิจการพบว่าต้นทุนการเลี้ยงจังหวัดในส่วนของการอยู่ที่ร้อยละ 86 ของต้นทุนทั้งหมด

การศึกษาการลดต้นทุนและเพิ่มมูลค่าการเลี้ยงจังหวัดบ้าน เพื่อลดต้นทุนค่าอาหารจากการผสมสูตรอาหาร 4 กรรมวิธี โดยมีวัตถุดิบคือ กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว เมล็ดข้าวโพด รำอ่อน มันเส้น และไบมันสำปะหลัง พบว่า ในรุ่นที่ 1 จังหวัดกินอาหารโปรตีน 21% มากที่สุด และใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงสั้นที่สุด คือ 41-42 วัน แต่มีต้นทุนอาหารถึง 35 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่างจาก

อาหารผสมเนื้ในไขมันสำปะหลัง 20% มีต้นทุนค่าอาหารต่อน้ำหนักจึงหรีดต่ำที่สุด มีต้นทุนค่าอาหารเฉลี่ย 22.74 บาทต่อกิโลกรัม ใช้เวลาในการเลี้ยง 44-47 วัน และในรุ่นที่ 2 ได้น้ำหนักจึงหรีดในสูตรที่ผสมกากมะพร้าว 20% มากที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆพบว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (สุกฤต และคณะ,2557)

จากการเปรียบเทียบอาหารเลี้ยงจึงหรีด โดยการเลี้ยงจึงหรีดตั้งแต่อายุ 7-45 วัน โดยใช้อาหารเลี้ยง 2 สูตร โดยมีการเลี้ยงด้วยหญ้าขนอย่างเดียวและหญ้าขนเสริมด้วยอาหารไก่ ซึ่งจึงหรีดสามารถเจริญเติบโตจนครบวงจรและออกลูกออกหลานได้ แต่การเลี้ยงด้วยหญ้าขนเสริมอาหารไก่ให้น้ำหนักจึงหรีดอายุ 45 วันสูงกว่าและมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีกว่าจึงหรีด ที่เลี้ยงด้วยหญ้าขนเพียงอย่างเดียว (อโนทัย และคณะ,2556)

2.6 อาหารเลี้ยงสัตว์

อาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์ถือเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง การเลี้ยงสัตว์ให้ได้ผลตอบแทนสูงที่สุดจะต้องรู้จักเลือกและจัดสรรอาหารที่เหมาะสมแก่สัตว์ทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ ทั้งนี้เนื่องจากค่าอาหารสัตว์เป็นต้นทุนการเลี้ยงสัตว์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับรายจ่ายอื่นๆ การให้อาหารแก่สัตว์มากเกินไปจะไม่เป็นการประหยัด เพราะสัตว์ได้รับเกินความต้องการและอาหารสูญเสียเปล่า แต่ถ้าให้อาหารจำนวนน้อยกว่าความต้องการของสัตว์จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตช้าและให้ผลผลิตต่ำ หรือการให้อาหารจำนวนที่เพียงพอกับความต้องการของสัตว์แต่ในอาหารที่ให้นั้นมีระดับโภชนะไม่สมบูรณ์ตามความต้องการของสัตว์อาจทำให้สัตว์เกิดโรคขาดอาหารและเจ็บป่วย เป็นต้น (ความต้องการโภชนะของสัตว์, 2561)

ดังนั้นผู้เลี้ยงสัตว์จะต้องพยายามให้สัตว์ได้รับอาหารในจำนวนที่พอเหมาะไม่มากหรือน้อยเกินไป และอาหารนั้นจะต้องมีโภชนะต่าง ๆ ที่สัตว์ต้องการครบถ้วน

สัตว์เลี้ยงแต่ละชนิด แต่ละประเภท เช่น สุกร สัตว์ปีก โค กระบือ มีความต้องการอาหารแตกต่างกันไป

โคนมมีความต้องการอาหารแตกต่างจากโคเนื้อ หรือโคนมที่กำลังให้นมต้องการอาหารแตกต่างจากไก่ไข่ เป็นต้น

นอกจากนี้ อายุ ขนาด และน้ำหนักของตัวสัตว์แต่ละชนิดมีผลทำให้ความต้องการอาหารและโภชนะต่าง ๆ แตกต่างกันไป

ดังนั้นผู้เลี้ยงสัตว์จะต้องศึกษาความต้องการอาหารของสัตว์ตามชนิด ขนาด และความสามารถในการให้ผลผลิตของสัตว์ ว่ามีความต้องการโภชนะแต่ละอย่างในจำนวนเท่าใด จึงจะ

สามารถกำหนดได้ว่าอาหารที่จะให้สัตว์ แต่ละตัวกินควรจะมีคุณภาพและปริมาณเท่าไรจึงจะพอดี (บุญล้อม ชีวะอิสระกุล, 2543)

อาหารที่สัตว์กินเข้าไปสัตว์จะนำไปเปลี่ยนเป็นเนื้อ นม ไข่ และผลผลิตอื่น เช่น ขน เขา เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในขบวนการต่าง ๆ ทางร่างกายด้วย เช่น การสืบพันธุ์ โลหิต การหายใจ การเคลื่อนไหว และระบบประสาท ดังนั้น การให้อาหารที่พอเหมาะทั้งปริมาณและความเข้มข้นของโภชนาตามความต้องการของสัตว์ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต จะช่วยให้ประหยัดอาหารและส่งผลดีต่อการให้ผลผลิตของสัตว์ เช่น การให้นม การให้ไข่ ฯลฯ ในระยะต่อไป

ในระยะสืบพันธุ์สัตว์ต้องการโภชนาจากอาหารเป็นพิเศษเนื่องจากต้องนำไปสร้างระบบสืบพันธุ์และเซลล์สืบพันธุ์ ได้แก่ ไข่ (ovum) ของเพศเมีย และสเปิร์ม (sperm) ของตัวผู้ หากสัตว์ได้รับโภชนาไม่ครบถ้วนในระยะสืบพันธุ์แล้วจะส่งผลต่อความสมบูรณ์ของสัตว์ได้เช่นกัน

บางครั้งผู้เลี้ยงสัตว์ก็มีความต้องการขุนสัตว์ก่อนส่งตลาดเพื่อให้เนื้อสัตว์ที่ได้จากการขุนมีรสชาติดีขึ้น การขุนสัตว์นั้นว่าเป็นการทำให้สัตว์มีการสะสมไขมันในร่างกาย ซึ่งการสะสมไขมันตามอวัยวะส่วนต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ตามปกติแล้วไขมันจะเริ่มมีการสะสมในบริเวณช่องท้องรอบ ๆ อวัยวะภายในก่อน ต่อมาจึงจะขยายการสะสมในบริเวณใต้ผิวหนังและสุดท้ายจึงจะเริ่มมีการสะสมไขมันในกล้ามเนื้อ ในการขุนสัตว์จึงต้องมีการให้อาหารให้ถูกจังหวะเวลาและหยุดการขุนเมื่อสัตว์ได้สะสมไขมันไว้ถึงจุดที่ต้องการพอดีจึงจะทำให้เนื้อที่มีคุณภาพตามความต้องการของตลาด

ในการขุนสัตว์อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามขนาดอายุของสัตว์ คือ

1) การขุนสัตว์ที่กำลังเติบโต ปัจจุบันผู้บริโภคนิยมเนื้อสัตว์ที่มีอายุน้อยหรือจากสัตว์ที่กำลังเติบโต เนื่องจากมีเนื้อนุ่ม ไม่เหนียวเหมือนเนื้อสัตว์ที่มีอายุแล้ว นอกจากนี้การเลี้ยงสัตว์อายุน้อยจะประหยัดอาหารกว่าและจำหน่ายได้เร็วกว่า ดังนั้นการขุนสัตว์ให้เติบโตไปพร้อม ๆ กับให้มีการสะสมไขมัน จึงมีความต้องการอาหารที่มีโปรตีน แร่ธาตุมาก ในขณะเดียวกันก็ต้องมีพลังงานในอาหารพอที่จะใช้ในการสร้างไขมันด้วย

2) การขุนสัตว์ที่โตเต็มที่แล้ว ในสัตว์ที่โตเต็มที่แล้วมีความต้องการอาหารเพื่อใช้ในการสร้างไขมันเป็นส่วนใหญ่ ความต้องการอาหารประเภทโปรตีนอยู่ในปริมาณเพื่อใช้ในการดำรงชีพและซ่อมแซมส่วนสึกหรอเท่านั้น โดยเหตุที่สัตว์ที่โตเต็มที่แล้วจะมีประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำ ดังนั้น การขุนสัตว์ระยะนี้จึงควรขุนในระยะเวลาน้อยที่สุดเพียงพอให้สัตว์สะสมไขมันได้ตามคุณภาพที่ตลาดต้องการ จึงจะประหยัดค่าใช้จ่าย

2.7 พืชอาหารสำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด

พืชอาหารสัตว์ (forage crops) หมายถึง พืชที่นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ทั้งลักษณะสดหรือแห้งหรือหมัก พืชอาหารสัตว์ หมายถึง พืชใดๆ ที่สัตว์กินเข้าไปแล้วทำให้เกิดประโยชน์แก่ร่างกายและ

ไม่เป็น พืชต่อสัตว์ด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีพืชอยู่หลายชนิด ที่สามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ซึ่งพอจะแยกได้ 2 ชนิดด้วยกันคือ พืชตระกูลหญ้า และพืชตระกูลถั่ว

2.7.1 กากถั่วเหลือง (Soybean meal)

เป็นผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันจากเมล็ดถั่วเหลือง(Glycine max) มีคุณสมบัติการย่อยได้สูง มีกรดอะมิโนที่จำเป็น เยื่อใยต่ำ เยื่อใยตัด มีโปรตีนสูงถึง 44-50%CP อย่างไรก็ตาม เมล็ดถั่วเหลืองดิบมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสัตว์ โดยทำให้สัตว์ชะงักการเจริญเติบโต ขนหยาบ และตับอ่อนโต ดังนั้น เมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการรีดน้ำมันที่มีความร้อนสูงแล้ว สารพิษเหล่านี้จะถูกทำลายไปด้วย



ภาพที่ 3 กากถั่วเหลือง (Soybean meal) และถั่วเหลือง

กากถั่วเหลืองมี 2 ชนิด คือ 1.กากถั่วเหลืองที่มีเปลือกผสมอยู่ด้วย หรือที่เรียกกันในทางการค้าว่ากากถั่วเหลือง 44% จากการวิเคราะห์คุณภาพของกากถั่วเหลืองชนิดนี้ โดยกองอาหารสัตว์พบว่าโปรตีนประมาณ 47.6 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใย (Crude fiber) ประมาณ 6.6 เปอร์เซ็นต์ 2. กากถั่วเหลืองที่ไม่มีเปลือกผสมอยู่ มีแต่เนื้อในล้วน ๆ หรือที่เรียกกันในทางการค้าว่ากากถั่วเหลือง 49% จากการวิเคราะห์พบว่าโปรตีนสูงถึง 51.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเยื่อใยต่ำกว่าชนิดที่เปลือกผสมคือ มีประมาณ 4.9 เปอร์เซ็นต์ กากถั่วเหลืองที่นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ จะต้องมีความชื้นไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นเกล็ด บาง เบา เมื่อใช้มือบีบจะมีลักษณะแข็ง กรอบ ไม่ดิบ หรือไหม้ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นสาบ และไม่มีสิ่งปลอมปน(สำนักงานพัฒนาอาหาร, 2559)

ลักษณะของกากถั่วเหลืองที่ไม่ควรนำมาใช้เลี้ยงสัตว์

1) มีความชื้นสูง กากถั่วเหลืองที่มีความชื้นสูงจะมีลักษณะจับกันเป็นก้อน มีขนาดไม่แน่นอนและเกิดเชื้อราได้ง่าย

2) ดิบหรือไหม้ ซึ่งเป็นผลจากการให้ความร้อนในขบวนการเผาไหม้ กากถั่วเหลืองดิบ หรือสุกไม่ดีพอ จะมีสีซีด กลิ่นเหม็นเขียว จับตัวกันเป็นก้อน สาเหตุมาจาก ความร้อนที่ให้แก่เมล็ดถั่วเหลือง เพื่อการระเหยน้ำ และความร้อนที่เกิดจากแรงอัด กากถั่วเหลืองที่เหมาะสมสำหรับใช้

เลี้ยงสัตว์ ควรจะมีค่า Urease Index (pH) อยู่ในช่วง 0.02–0.2 ซึ่งจากการตรวจสอบตัวอย่างกากถั่วเหลือง โดยกองควบคุมคุณภาพอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์พบว่า ตัวอย่างกากถั่วเหลืองจำนวน 98 เปอร์เซ็นต์ มีค่า pH อยู่ในช่วง 0–0.25 ส่วนตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่ค่อนข้างดิบมีค่า pH สูงกว่า 0.25 มีเพียง 2 % เท่านั้น กากถั่วเหลืองใหม่ จะสังเกตได้ว่ามีกลิ่นเหม็นไหม้ และมีรสขม เพราะความร้อนที่ใช้ในขบวนการผลิตสูงกว่าอุณหภูมิที่กำหนด กากถั่วเหลืองประเภทนี้จะมีคุณค่าทางอาหารลดต่ำลง เพราะการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร โดยเฉพาะกรดอะมิโนจำเป็น เช่น ไลซีน เมไทโอนีน จะใช้น้อยลง

3) กากถั่วเหลืองเก่า จะมีกลิ่นเหม็นหืน หรือเหม็นสาบ หรือมีแมลงขึ้น หรืออาจเกิดเชื้อรา ดังนั้น เกษตรกรที่ซื้อกากถั่วเหลืองมาเพื่อผสมอาหารสัตว์จะต้องระวัง ไม่เลือกซื้อกากถั่วเหลืองที่มีลักษณะดังกล่าว เพราะสัตว์ไม่ชอบกิน จะกินน้อยลงทำให้สัตว์ได้รับอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการ คุณค่าทางอาหารต่ำ โดยโปรตีนจะลดลงทั้งปริมาณ และคุณภาพ อาจมีสาร Aflatoxin จากเชื้อรา หรืออาจปนเปื้อนเชื้อโรคติดต่อจากสัตว์

4) มีสิ่งปลอมปน ซึ่งบางครั้งจะสังเกตเห็นได้ยาก กากถั่วเหลืองประเภทนี้จะมีคุณค่าทางอาหารผิดปกติ เช่น ปลอมปนด้วยขี้ข้าวโพด หรือรำข้าว จะทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงในขณะที่ค่าเถ้าอยู่ในระดับปกติ ถ้าปลอมปนด้วย ดิน หิน จะทำให้โปรตีนลดลง แต่ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น หรือถ้าปลอมปนด้วยกากถั่วเหลือง จะไม่ทำให้ปริมาณโปรตีนลดลง แต่คุณภาพของโปรตีนจะลดลง

2.7.2 เมล็ดข้าวโพด (Core; Zea mays)

เป็นพืชที่ให้คาร์โบไฮเดรต และพลังงานสูง และเป็นพืช C4 ที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและสภาพอากาศร้อนได้ดี (วิโรจน์ ภัทรจินดา, 2555) โดยข้าวโพดเป็นวัตถุดิบอาหารพลังงานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในสูตรอาหารสุกร และสัตว์ปีกชนิดต่างๆ ในประเทศไทย (ยกเว้นเป็ด) มาเป็นเวลานาน ข้าวโพด ที่ปลูกและใช้เลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยเป็นชนิดเม็ดแข็ง (dent corn) มีโปรตีนโดยเฉลี่ยประมาณ 8% มีไขมันประมาณ 3% และมีเยื่อใยประมาณ 2-2.5% ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่ไม่มีสารพิษ หรือสารขัดขวางโภชนะ ดังนั้น ข้าวโพด จึงมีคุณสมบัติไม่มีขีดจำกัดการใช้ในสูตรอาหาร และสามารถใช้อย่างเต็มที่ (100%) ในสูตรอาหารสัตว์ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 4 เมล็ดข้าวโพด (Core; Zea mays)

แป้งในข้าวโพดเป็นชนิดแป้งแข็ง (hard starch) จึงเป็นแป้งที่ดูดน้ำเข้ามาในโมเลกุลช้า ทำให้การย่อยแป้งข้าวโพดในระบบทางเดินอาหารช้าตามไปด้วย ดังนั้นข้าวโพดจำเป็นต้องถูกบดให้มีขนาดชิ้นเล็ก หรือบดให้ละเอียดก่อนใช้เลี้ยงสัตว์ ข้าวโพดที่บดละเอียดเป็นอย่างดีจะทำให้ร่างกายสามารถย่อย และใช้ประโยชน์ข้าวโพดได้ดี อีกทั้งทำให้ข้าวโพดมีค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้สูงตามไปด้วยไขมันในข้าวโพดเป็นไขมันเหลว และเป็นไขมันไม่อิ่มตัว มีกรดลิโนเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันจำเป็นในอาหารเป็นองค์ประกอบ 50% นอกจากนี้ข้าวโพดยังมีสารแซนโทฟิลล์ (xanthophylls) ได้แก่ สารซีแซนทีน (Zeaxanthin) และสารลูเทออิน (lutein) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยก่อให้เกิดสีเหลือง-เหลืองส้มในไข่แดง และทำให้เกิดสีเหลืองที่ผิวหนัง และแข้งของไก่กระทิงในปริมาณสูง ข้าวโพดจึงถูกใช้เป็นวัตถุดิบอาหารพลังงานหลักในสูตรอาหารไก่ ทั้งไก่เนื้อ ไก่ไข่ รวมทั้งอาหารนกกระทาไข่

อย่างไรก็ตามข้าวโพดก็ถือว่าเป็นวัตถุดิบอาหารที่เชื้อราสามารถเจริญเติบโตได้ดี และข้าวโพดในเขตร้อนชื้นมักจะประสบปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษเชื้อรา ได้แก่ สารพิษอะฟลาทอกซิน สารพิษซีราลีโนน สารพิษไวมีทอกซิน ฯลฯ อยู่เสมอ ซึ่งสารพิษเชื้อราเหล่านี้มีผลทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโต และมีประสิทธิภาพของการใช้อาหารด้อยลง ประสิทธิภาพการสืบพันธุ์ด้อยลงด้วย แม้สุกรแท้งลูกขณะอุ้มท้อง การให้ผลผลิตของสัตว์ เช่น ไข่ และนม ลดลง อีกทั้งยังมีผลโดยตรงต่อสุขภาพ และการสร้างภูมิคุ้มกันโรคของสัตว์ด้วย และข้าวโพดที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์จึงควรมีความชื้นต่ำไม่เกิน 13-14% และที่สำคัญ คือ ต้องไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อรา หรือสารพิษของเชื้อราต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อตัวสัตว์ ซึ่งข้าวโพดดังกล่าวจะมีคุณค่าทางอาหารใกล้เคียงกับปลายข้าว หรือใกล้เคียงกับวัตถุดิบอาหารพลังงานชนิดอื่นๆ

2.7.3 รำข้าว (Rice bran)

ได้มาจากเมล็ดข้าว(Oryza sativa) ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว สามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ได้เป็นอย่างดี โดยรำที่มีขายในท้องตลาดจะมีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ รำข้าวเจ้า รำข้าวเหนียว และรำข้าวเนียง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวเจ้า ข้าวเหนียว และข้าวเนียง ตามลำดับ



ภาพที่ 5 รำข้าว (Rice bran)

รำละเอียดทุกชนิดโดยทั่วไปมีองค์ประกอบคุณค่าทางอาหารไม่แตกต่างกันมาก โดยมีโปรตีนประมาณ 12% ไขมันประมาณ 12-13% (สำนักงานพัฒนาอาหาร, 2560) และเยื่อใยประมาณ 13% เช่นกัน และมีองค์ประกอบคุณค่าทางอาหารอื่นๆ รำละเอียดจึงเป็นวัตถุดิบอาหารที่ให้โปรตีนและไขมันสูงกว่าปลายข้าว ในขณะที่รำละเอียดมักมีราคาถูกกว่าปลายข้าว การใช้รำละเอียดในสูตรอาหารจึงมักทำให้สูตรอาหารมีราคาถูกลง ไขมันในรำละเอียดเป็นไขมันเหลว มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง โดยเฉพาะกรดลิโนเลอิก (linoleic acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันจำเป็นสำหรับสัตว์ปีก รำละเอียดจึงเหมาะที่จะใช้เป็นวัตถุดิบอาหารเลี้ยงสุกรและสัตว์ปีก เพื่อใช้เป็นแหล่งให้กรดไขมันจำเป็นในอาหารดังกล่าว อีกทั้งยังเหมาะใช้เลี้ยงสุกรเพื่อเป็นแหล่งให้ไขมันเหลวในสูตรอาหาร ช่วยป้องกันอาการไขมันแข็งในซากสุกรด้วย รำละเอียดถือว่าเป็นวัตถุดิบอาหารพลังงานพื้นฐานที่มีการใช้ในสูตรอาหารสุกรและสัตว์ปีกชนิดต่างๆ มาเป็นระยะเวลายาวนาน โดยใช้ในระดับสูงสุดไม่เกิน 30% ในสูตรอาหาร และมักใช้ร่วมกับวัตถุดิบอาหารพลังงานอื่นๆ เช่น ปลายข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง หรือมันสำปะหลัง โดยทั่วไปรำละเอียดมีราคาถูกกว่าปลายข้าว แต่มีระดับโปรตีนสูงกว่า ดังนั้นรำละเอียดมักจะถูกเลือกใช้ในสูตรอาหารสัตว์ เพราะเป็นแหล่งโปรตีนราคาถูกด้วย เมื่อใช้ในสูตรอาหารแล้วทำให้สูตรอาหารมีราคาถูกลง (อุทัย คันโร 2560)

อย่างไรก็ตามรำละเอียดเป็นวัตถุดิบอาหารที่มีระดับเยื่อใยอยู่ในเกณฑ์สูง (12-13%) และมีความฟูหรือฟามมาก รำละเอียดจึงควรใช้ในสูตรอาหารสัตว์ชนิดต่างๆ ได้ไม่เกิน 50% ในสูตรอาหาร หากใช้ในระดับสูงมากกว่านี้จะมีผลทำให้อาหารมีลักษณะฟามมาก ทำให้สัตว์กินอาหารได้

น้อย และมีผลทำให้การเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารด้อยลง สัตว์ระยะเล็กที่ต้องการอาหารที่มีระดับเยื่อใยต่ำ จึงทำให้มีการใช้รำละเอียดในสูตรอาหารดังกล่าวในระดับต่ำตามไปด้วย รำละเอียดที่ใช้ควรมีคุณภาพดี ได้แก่ มีความชื้นต่ำ ไม่มีการปนปลอมของเกลบด ดินขาว หรือหินฝุ่น มีระดับเยื่อใยไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ไขมันในรำละเอียดยังไม่หืน รำละเอียดไม่ขึ้นรา หรือจับเป็นก้อน ไม่มีการปนเปื้อนของยาฆ่าแมลง รำละเอียดดังกล่าวจึงจะเป็นวัตถุดิบอาหารที่ดีแก่สัตว์ ไขมันในรำละเอียดเป็นไขมันไม่อิ่มตัว มีโอกาสหืนได้ง่าย และทำให้อายุการเก็บรำละเอียดสั้นลง รำละเอียดที่แห้ง (ความชื้นต่ำ) และเก็บไว้ในกระสอบป่าน ควรใช้ให้หมดภายใน 2-3 สัปดาห์ แต่ถ้ารำละเอียดนั้นมีความชื้นสูง จะเกิดการหืนที่เร็วขึ้น ยิ่งทำให้อายุการเก็บรำละเอียดสั้นลงไปอีก การใช้รำละเอียดจากข้าวนาปรังจะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะรำละเอียดดังกล่าวมักจะมี ความชื้นสูง และเก็บได้ไม่นาน เกิดการหืน และขึ้นราง่าย นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่มียาฆ่าแมลงปนเปื้อนมาด้วย ถ้าจำเป็นต้องใช้รำละเอียดดังกล่าวควรรีบใช้โดยเร็ว และควรใช้เป็นอาหารของสัตว์ที่มีความทนทานต่อสารพิษสูง เช่น สุกรขุน เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากหลีกเลี่ยงการใช้รำละเอียดคุณภาพต่ำดังกล่าวได้ ก็ควรหลีกเลี่ยงไม่ใช้รำละเอียดนั้นในอาหารสัตว์ รำข้าวนาปรังที่มีความชื้นสูง ไม่แนะนำให้ใช้ในอาหารสัตว์วัยอ่อนและวัยรุ่น รวมทั้งในอาหารสัตว์พ่อแม่พันธุ์และอาหารไก่ไข่ เพราะสัตว์เหล่านี้มีความไวต่อสารพิษเชื้อราและสารพิษยาฆ่าแมลง ที่อาจปนเปื้อนมากับรำละเอียด ทำให้เปอร์เซ็นต์การไข่ของไก่ลดลง แม่สุกรเกิดการแท้งลูกได้ (อุทัย คันธ, 2529)

2.7.4 กากมันหมักยีสต์

กากมันสำปะหลัง เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากวัตถุดิบเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลังหาซื้อได้ง่าย และมีราคาถูก โดยการนำมาแปรรูปหมักร่วมกับน้ำหมักยีสต์เพื่อช่วยเพิ่มโปรตีน และพลังงานตลอดจนคุณค่าทางโภชนาการ อื่นๆ ตามความต้องการของสัตว์ ที่สำคัญกากมันหมักยีสต์มีต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งเกษตรกรสามารถผลิตใช้ได้ในฟาร์มสามารถช่วยแก้ปัญหาวิกฤตอาหารสัตว์ราคาแพงในปัจจุบัน ตลอดจนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในโคนม-โคเนื้ออีกด้วย โดยเกษตรกรสามารถผลิตใช้เองได้ในฟาร์มหรือในครัวเรือน นอกจากนี้ กากแป้งมันสำปะหลังหมักยีสต์ ยังมีวิตามินแร่ธาตุที่สำคัญสำหรับสัตว์ช่วยให้สัตว์ เจริญเติบโตได้ดี สามารถใช้เป็นวัตถุดิบผสมเป็นอาหารสัตว์ได้หลายชนิด ทั้งสุกร เป็ด ไก่ โคเนื้อ โคนม แพะ จิ้งหรีด หรือแม้แต่ปลากินพืช ซึ่งมันหมักยีสต์ถือเป็นนวัตกรรมใหม่ด้านอาหารสัตว์ ที่เป็นที่ยอมรับ โดยต้นทุนการผลิตขณะนี้อยู่ที่ 0.6 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 3.38 บาทต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง (ศุภชัย อุดชาชน และคณะ, 2558)

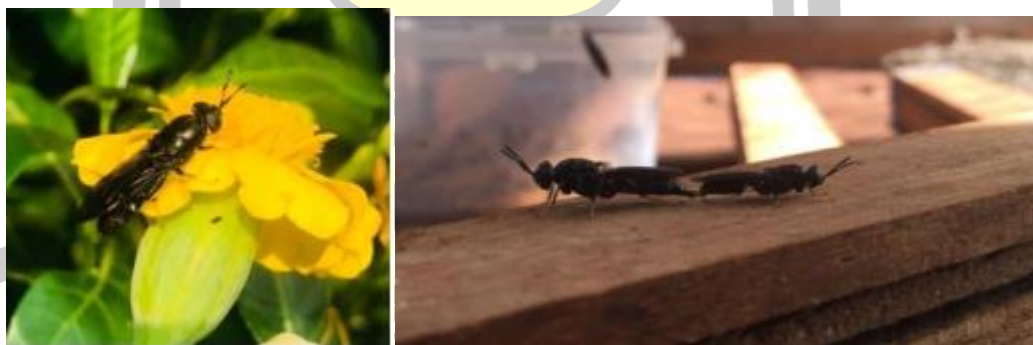


ภาพที่ 6 กากมันหมักยีสต์

2.8 แมลงวันลาย (Black soldier fly larvae; BSFL)

2.8.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแมลงวันลาย

แมลงวันลาย (Black Soldier fly) พบได้ทั่วไปในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนและเขตอบอุ่น เป็นแมลงที่ไม่เป็นพาหะนำโรค ไม่เป็นศัตรูพืช และไม่ก่อให้เกิดความรำคาญต่อชุมชน ตัวเต็มวัยมีขนาดความยาว 20 มิลลิเมตร ลำตัวสีดำ ถ้าแมลงวันลายเป็นเจ้าถิ่น (หรือทำการวางไข่) แมลงวันลายจะปล่อยสารยับยั้งการวางไข่ของหนอนแมลงวันบ้าน (Allomone) ทำให้แมลงวันบ้านไม่เข้ามาใกล้บริเวณนั้นๆ ซึ่งเป็นการควบคุมแมลงวันบ้านได้ (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)



ภาพที่ 7 ลักษณะตัวเต็มวัยของหนอนแมลงวันลาย
(สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

2.8.2 วงจรแมลงวันลาย

วงจรชีวิตแมลงวันลายเริ่มจากไข่แมลงวันลายมีอายุประมาณ 4 วัน ระยะเวลาในการฟัก 4-7 วัน เมื่ออายุประมาณ 18 วันตัวหนอนเริ่มออกจากอาหารเพื่อเข้าสู่ระยะก่อนดักแด้ ระยะ

ก่อนเข้าดักด้มมีอายุ 10-17 วัน ระยะดักด้มมีอายุ 6-10 วัน และตัวเต็มวัยมีอายุ 4-6 วัน แมลงวันลายจะเริ่มผสมพันธุ์หลังจากที่ออกจากดักด้ได้ 2-4 วัน หลังจากนั้นก็จะวางไข่ภายในวันที่ 5-6 วันที่ 7-10 ก็จะตาย สำหรับการวางไข่ของหนอนแมลงวันลาย จะวางไข่ในที่แห้งและอยู่เหนืออาหาร ระยะห่างตั้งแต่ 10-50 เซนติเมตร โดยมีจำนวนไข่ตั้งแต่ 400 – 800 ฟอง ต่อกลุ่มไข่(สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ลักษณะไข่หนอนแมลงลายและตัวหนอนแมลงวันลาย
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)



ภาพที่ 9 วงจรชีวิตของหนอนแมลงวันลาย
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

2.8.3 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการเลี้ยง

1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแมลงวันลายและการกินอาหาร อยู่ในช่วง 24-30 องศาเซลเซียส ถ้าหาอุณหภูมิสูงเกินไปตัวหนอนแมลงวันวันจะได้ออกจากอาหารเพื่อ

ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมกว่า แต่หากอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากความต้องการอาหารน้อย การเจริญเติบโตจะช้า นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการวางไข่อยู่ที่ 31.8 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการวางไข่ที่ 27.5 -37.5 องศาเซลเซียส

2) ความชื้น

ความชื้นที่มาจากแหล่งอาหารของหนอนแมลงวันลาย อาทิ เศษผัก ผลไม้และอาหารที่มีค่าระหว่าง 60-90% หนอนแมลงวันลายสามารถย่อยสลายขยะอินทรีย์ ในช่วงความชื้นดังกล่าวได้ แต่ทั้งนี้ความชื้นมากกว่า 80% จะทำให้การคัดแยกหนอนแมลงวันลายได้ง่ายจะอยู่ที่ช่วง 70-75%

3) แสง

แสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการผสมพันธุ์ของหนอนแมลงวันลาย โดยเฉพาะช่วงฤดูหนาวที่มีปริมาณแสงน้อยจะมีผลต่อการผสมพันธุ์ของแมลงวันลาย ดังนั้นการจัดทำโรงเรือนเพาะเลี้ยงแมลงวันลายจำเป็นต้องมีระบบแสง อาทิ หลอดไฟโปร่งแสงโดยปกติการผสมพันธุ์ของแมลงวันลายจะเกิดขึ้นตอนเช้า

4) อาหาร

แมลงวันลายจะอาศัยน้ำและน้ำหวานจากเกสรดอกไม้เป็นอาหารในการดำรงชีวิต สำหรับตัวหนอนแมลงวันลายนั้นพบว่ามีสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตควรอุดมไปด้วยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นหนอนแมลงวันลายมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเศษอาหาร ขยะเปียกจากชุมชน มูลสัตว์ รวมทั้งเศษไม้ซี้ที่เน่าเปื่อย

2.8.4 ประโยชน์ของหนอนแมลงวันลาย

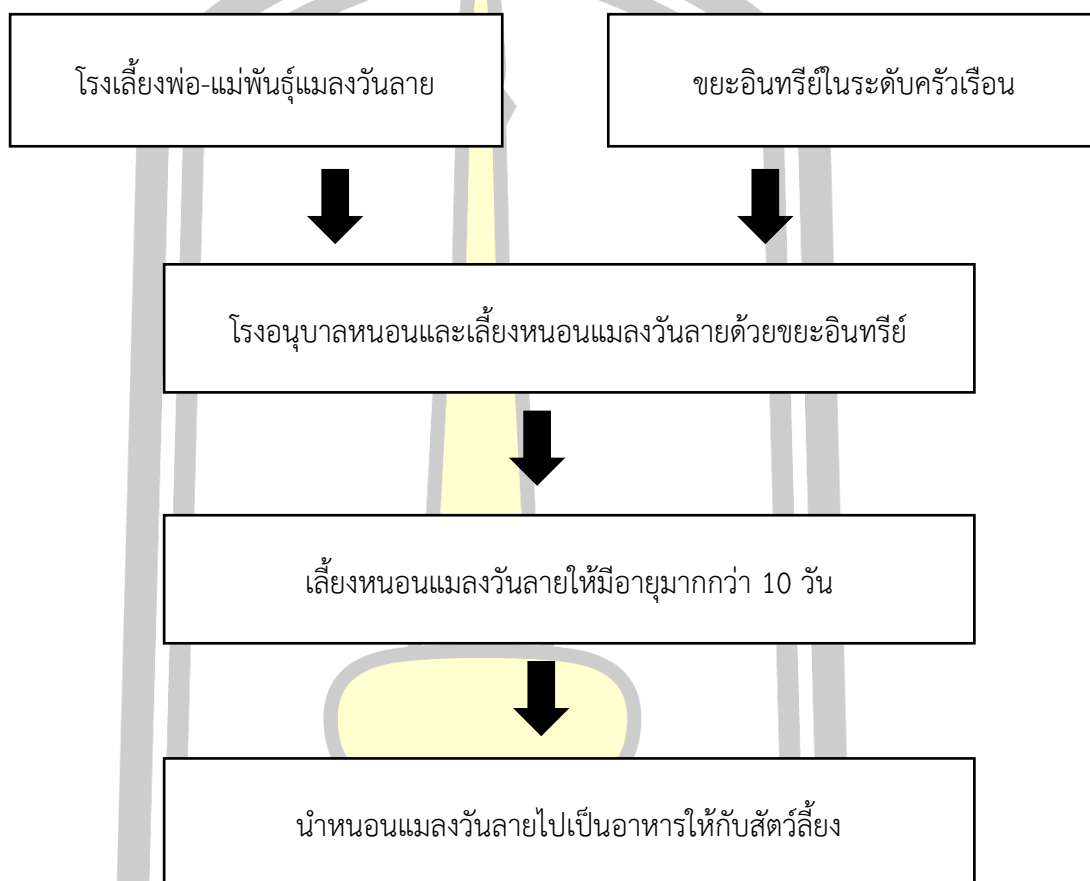
ตัวหนอนแมลงวันลายสามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่อมีอายุ 25 วันขึ้นไปจนกว่าตัวหนอนจะออกจากอาหารเอง เพื่อเตรียมตัวเข้าดักแด้ ระยะก่อนเข้าดักแด้สามารถนำไปเพาะเป็นพ่อแม่พันธุ์เพื่อขยายต่อไป เศษอาหาร ขยะอินทรีย์ที่หนอนย่อย สามารถนำไปเป็นปุ๋ยบำรุงดิน

ตัวหนอนตัวเต็มวัย มีโปรตีนสูง ไขมัน โอเมก้า เส้นใยอาหาร แคลเซียม และกรดลอริกสูง จึงเหมาะที่จะนำไปเป็นอาหารไก่ ไก่ชน ปลาสวยงาม นกและสัตว์เลื้อยคลานอื่นๆ

คุณค่าทางโภชนาการในตัวหนอนแมลงวันลายพบว่าที่ระยะเวลา 1-14 วัน ตัวหนอนแมลงวันลายโปรตีนอยู่ในช่วง 38-56% และไขมัน 4-28% ระยะก่อนดักแด้มีโปรตีนอยู่ในช่วง 40.2-40.4% และไขมัน 24.2-28% ระยะดักแด้ มีโปรตีนอยู่ในช่วง 43.8-46.2% และไขมัน 7.2-8.2% ระยะตัวเต็มเพศผู้ มีโปรตีนอยู่ในช่วง 44.0% และไขมัน 32.2% ระยะตัวเต็มเพศเมีย มีโปรตีนอยู่ในช่วง 43.8% และไขมัน 30.6 % (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

2.8.5 ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

ระบบการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายสามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบ ได้แก่ระบบโรงเรือนในการเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์ ระบบการเลี้ยงตัวอ่อนและหนอนแมลงวันลาย



2.8.6 ระบบโรงเรือน

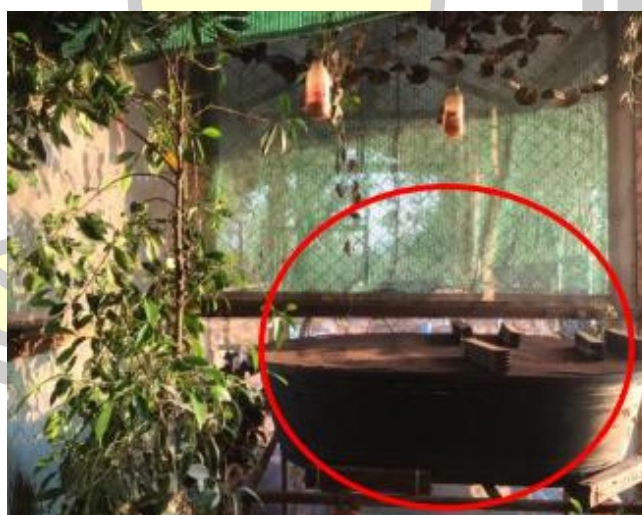
ลักษณะโรงเรือนในการเลี้ยง หนอนแมลงวันลายประกอบด้วยส่วนที่เป็นโรงเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์แมลงวันลาย ซึ่งส่วนนี้จะมีการตกแต่งให้เหมือนธรรมชาติให้กับแมลงวันลาย โดยจะประกอบด้วยระบบการให้น้ำ ระบบให้น้ำหวานเป็นอาหารพ่อแม่พันธุ์ และต้องมีการติดตามช่วยในการป้องกันศัตรูแมลงวันลาย นอกจากนี้ ในห้องเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์ จะแบ่งออกเป็น 2 โซน ได้แก่ โซนหนึ่งซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางอุปกรณ์ดักไข่แมลงวันลาย และโซนแยกพร้อมติดสเปรย์น้ำ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลักษณะโรงเรือนในการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

1) อุปกรณ์ภายในโรงเลี้ยงพ่อ-แม่พันธุ์แมลงวันลาย

มีระบบการวางถาดสำหรับใส่ดักแด้เพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นพ่อ-แม่พันธุ์ ต่อไป และชั้นบนมีชั้นที่วางไข่ของแม่พันธุ์ และเนื่องจากพ่อ-แม่พันธุ์ กินน้ำ และน้ำหวาน ดังนั้นภายในโรงเลี้ยงแมลงวันลาย จะมีระบบให้น้ำอัตโนมัติแก่พ่อ-แม่พันธุ์แมลงวันลาย



ภาพที่ 11 ระบบการวางถาดเพาะพ่อ-แม่พันธุ์
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)



ภาพที่ 12 ที่วางไข่ของแม่พันธุ์
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)



ภาพที่ 13 ระบบให้น้ำ ตั้งเวลาอัตโนมัติ
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

2) โรงเลี้ยงและอนุบาลหนอนแมลงวันลาย

สำหรับอุปกรณ์และระบบในส่วนที่เป็นโรงเลี้ยงหนอนแมลงวันลายนั้นจะประกอบไปด้วย ระบบอนุบาลตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายในชั้นวาง โดยอาหารหนอนแมลงวันลายที่จะนำมาเติมในแต่ละวัน ได้แก่ เศษผัก ผลไม้ และเศษอาหาร รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 14 และ 15



ภาพที่ 14 ถาดเลี้ยงหนอนในชั้นวาง
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)



ภาพที่ 15 ระบบอนุบาลตัวอ่อนหนอนแมลงวันลาย
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

2.8.7 ขั้นตอนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

1) การเตรียมอาหารล่อแมลงวันลายตามธรรมชาติ

แมลงวันลายอยู่อาศัยได้ทั่วไปในเขตร้อนชื้น ในประเทศไทยพบได้ทุกจังหวัด ดังนั้นสำหรับผู้เริ่มต้นในการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย สามารถที่จะเตรียมอาหาร เพื่อดึงดูดแมลงวันลาย มาวางไข่ได้ ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ดังภาพที่ 16

- 1) กะละมังพลาสติกเบอร์ 50-60 จำนวน 1 ใบ
- 2) รำข้าว 2 กิโลกรัม (รำหยาบ)
- 3) กากน้ำตาล 2 ลิตร
- 4) น้ำหมัก EM 200 มิลลิลิตร
- 5) ข้าวสารข้าวเหนียว 1 กิโลกรัมหรือปลายข้าวเหนียว 1 กิโลกรัม
- 6) น้ำเปล่า



ภาพที่ 16 การล่อแมลงวันลายเพื่อการวางไข่
ที่มา: (สมควร โพธารินทร์ และคณะ, 2563)

ขั้นตอนที่ 2 การหมักอาหารเพื่อดึงดูดแมลงวันลายตามธรรมชาติให้มาวางไข่

1) นำวัตถุดิบจากขั้นตอนที่ 1 ทั้งหมดมาคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยให้มีความชื้นที่ 70-80% (สังเกตจากการปั้นและบีบก้อนอาหารจะมีน้ำหยด 3-4 หยด)

2) ทำความสะอาดรอบๆ กะละมัง แล้วนำไปวางใต้ร่มไม้ ใต้ชายคา ห้ามไม่ให้โดนแดดทั้งวัน ห้ามโดนฝน วางให้ไกลจากแหล่งที่คนพลุกพล่านและให้ห่างจากแหล่งที่ใช้สารเคมี และยาฆ่าแมลง

3) ทั้งไว้โดยไม่ต้องใช้อะไรคลุม ประมาณ 15 – 20 วันจะมีตัวอ่อนของหนอนแมลงวันลายเกิดขึ้น (หากไม่มีหนอนเกิดขึ้นแสดงว่าบริเวณใกล้เคียงนั้นๆ มีการใช้สารเคมี หรือไม่มีแมลงวันลายอยู่ในบริเวณนั้นๆ)

ขั้นตอนที่ 3 การให้อาหารตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายจากธรรมชาติ

หลังจากครบ 15-20 วันให้นำกะละมังมาดู ถ้ามีตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายให้พลิกอาหารที่หมักแล้วค่อยขยี้อาหารส่วนที่แข็งจนละเอียด แล้วค่อยนำเศษอาหาร เศษผลไม้มาวางให้ตัวอ่อนกิน

ขั้นตอนที่ 4 การคัดแยกหนอนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

ตัวอ่อนอายุครบ 25 วัน สามารถนำหนอนไปเป็นอาหารสัตว์ได้ โดยการเกลี่ยอาหารมารวมกันเป็นกอง ตัวอ่อนแมลงวันลายจะมุดลงด้านล่างให้เก็บเศษอาหารที่ตัวอ่อนย่อยออกมาจนเห็นตัวอ่อนมารวมกัน จึงทำให้จับหรือตักไปใช้งานได้

2.8.8 หลักการในการคิดต้นทุนการผลิตหนอนแมลงวันลาย

ในการประเมินต้นทุนการผลิตหนอนแมลงวันลายจะประกอบไปด้วยต้นทุนในการก่อสร้างหรือเตรียมโรงเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายแบบวงจรและต้นทุนในการดำเนินการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ระบบโรงเรือนเพาะเลี้ยงแมลงวันลายแบบครบวงจร ซึ่งต้นทุนในการก่อสร้างหรือการใช้สิ่งปลูกสร้างที่มีอยู่เดิม ซึ่งมีราคารลงทุนก่อสร้างและค่าแรงตั้งแต่ 10,000 บาทขึ้นไป

2) ค่าดำเนินการ ได้แก่ ค่าอาหารตั้งต้นตามสูตรล่อแมลงวันลาย เพื่อการวางไข่ ซึ่งประกอบด้วย

-ข้าวสารข้าวเหนียวหรือปลายข้าวสารข้าวเหนียว 1 กิโลกรัม ราคา 20 [km

-รำหยาบ 2 กิโลกรัม ราคา 30 บาท

-EM 200 มิลลิลิตร ราคา 20 บาท

-กากน้ำตาล 2 ลิตร ราคา 30 บาท

ทั้งนี้สูตรอาหารตั้งต้นในการล่อแมลงวันลาย รวม 100 บาท ซึ่งสามารถล่อแมลงวันลายในโรงเพาะเลี้ยงแบบครบวงจรได้ตลอดทั้งปี

3) ค่าอาหารหนอนแมลงวันลาย 25 บาท สามารถเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายได้ 40 กิโลกรัม ในเวลา 20 วัน

4) ค่ายานพาหนะเก็บขนขยะอินทรีย์ในกรณีที่ต้องนำขยะอินทรีย์จากนอกชุมชน ประมาณการที่ 4 บาท/กิโลกรัม

5) ค่าแรงการดำเนินการ ซึ่งการเพาะหนอนแมลงวันลายจะใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง/วัน คิดเป็น 40 บาทต่อชั่วโมง (ประมาณการค่าแรงขั้นต่ำ 300 บาท/วัน)

2.9 การประกอบสูตรอาหารเบื้องต้น

การประกอบสูตรอาหาร (feed formulation) ในการเลี้ยงสัตว์เศรษฐกิจมักมีการประกอบสูตรอาหารให้แก่สัตว์ โดยเรียกสูตรอาหารที่ประกอบขึ้นว่า ไดเอท (diet) หรือเรชั่น(ration) หมายถึง ปริมาณอาหารที่ให้สัตว์กินเต็มที่ในแต่ละช่วงเวลา โดยสูตรอาหารที่สร้างขึ้นประกอบด้วย วัตถุดิบอาหาร(feedstuff หรือ feed ingredient) ชนิดต่างๆซึ่งมีหลายประเภท (จิมาภรณ์ จันท์สม, 2563) ได้แก่

ประเภทให้พลังงาน เป็นวัตถุดิบที่ใช้อัตราส่วนผสม ในอาหารสัตว์เป็นส่วนมาก คุณสมบัติโดยทั่วไปของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่จัดว่าให้พลังงาน ได้แก่ พลังงานไม่ต่ำกว่า 2,000 แคลอรีต่อกิโลกรัม มีโปรตีนน้อยกว่าร้อยละ 20 วัตถุดิบที่เป็นพลังงานสำหรับการประกอบอาหารสัตว์ส่วนใหญ่ได้จากเมล็ดพันธุ์พืช พืชหัวหรือ ราก นอกจากนี้ยังได้จากไข และน้ำมันที่ได้จากพืช หรือ สัตว์ ซึ่งทั้งหมดนี้มีพืชที่นำมาประกอบอาหารสัตว์ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวเปลือกบด ปลายข้าว รำ ข้าว เป็นต้น

ประเภทให้โปรตีน คุณสมบัติของวัตถุดิบอาหารที่จัดว่าเป็นแหล่งที่ให้โปรตีน ควรจะมีโปรตีน อยู่ส่วนประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ซึ่งได้จากสัตว์และพืช การเลือกอาหารโปรตีนชนิดต่างๆ เพื่อนำไปประกอบสูตรอาหารนั้น ควรจะต้องพิจารณาจากตัวของสัตว์ เช่น ชนิดของขนาดตัว และความต้องการ รวมถึงการพิจารณาจากปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในอาหาร คำนวณกับราคาของอาหารหรือไม่ มี ชนิด และจำนวนของกรดอะมิโนแต่ละชนิดเพียงพอกับความต้องการของสัตว์หรือไม่ วัตถุดิบโปรตีน เช่น วัตถุดิบจากปลาขนาดเล็ก กระดูกสัตว์ เลือดสัตว์ พืชตระกูลถั่วโดยมักใช้กาก และกากปาล์ม

ประเภทอาหารให้แร่ธาตุ แร่ธาตุเป็นสารพวกอินทรีย์มีแหล่งที่ มาจากดิน และหินอยู่ในรูปของธาตุเดี่ยว หรือ อยู่ในรูปสารประกอบ อาหารที่ให้แร่ธาตุส่วนใหญ่สัตว์ต้องการน้อยแต่ยังมีความจำเป็น ยกเว้นแคลเซียมและฟอสฟอรัส ที่มีความต้องการเป็นหลัก ดังนั้นการใช้เพื่อความ สะดวกจึงมักใช้การผสมไว้ก่อน(premix)

ประเภทเสริมวิตามิน แหล่งวิตามินส่วนใหญ่จะได้รับการสังเคราะห์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของวิตามินอย่างเดียว หรือสารประกอบของวิตามิน วิตามินเป็นสารที่ใช้ในปริมาณน้อย บางชนิดสัตว์ ต้องการน้อย โดยที่ใช้อาจเป็นหน่วยมิลลิกรัม หรือไมโครกรัมต่ออาหาร 100 กิโลกรัม หรือ ใช้เป็น ความเข้มข้นของหน่วยสากล ดังนั้น ผู้เลี้ยงมักใช้ในรูปของวิตามินพรีมิกซ์ ซึ่งเป็นสารผสมล่วงหน้า

2.10 การคำนวณสูตรอาหารอย่างง่ายสำหรับสัตว์เล็กและสัตว์ปีก

สัตว์มีความต้องการสารอาหารชนิดต่างๆ ได้แก่ โปรตีน กรดอะมิโน ไขมัน วิตามิน แร่ธาตุ และพลังงาน เพื่อนำไปใช้ในการดำรงชีวิต การเจริญเติบโต และการให้ผลผลิต แต่ในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้อยู่ทั่วไปจะมีสารอาหารเหล่านี้ไม่พอดีกับความต้องการของสัตว์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำวัตถุดิบอาหารสัตว์หลายชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้อาหารผสมที่มีสารอาหารต่างๆ ครบตามความต้องการของสัตว์ (นพวรรณ ชมชัย, 2542)

2.10.1 การคำนวณสูตรอาหารโดยใช้วัตถุดิบ 2 ชนิดเป็นส่วนประกอบ

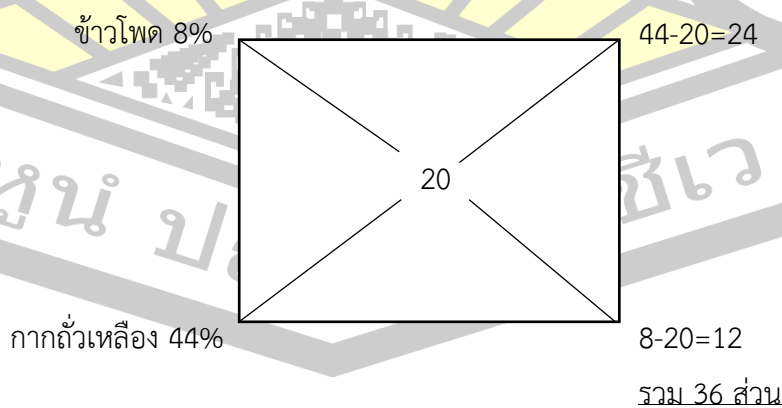
วิธีการเปียสัน-สแควร์ (Person's square method)

อาศัยหลักการที่ว่าอาหารผสม จะประกอบด้วยวัตถุดิบประเภทให้พลังงาน ซึ่งมีโปรตีนต่ำและมีวัตถุดิบหลัก ให้โปรตีนสูงในอัตราที่พอเหมาะเพื่อให้ได้โภชนะ ตามต้องการ ทั้งนี้ระดับโปรตีนที่ต้องการนั้นจะต้องอยู่ระหว่างระดับโปรตีนของวัตถุดิบ 2 ชนิดนั้น โดยใช้ตารางสี่เหลี่ยมช่วยในการคำนวณ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เขียนตารางสี่เหลี่ยมไว้ทางซ้ายมือของกระดาษ
- 2) ใส่ค่าเปอร์เซ็นต์โปรตีนของอาหารผสมที่ต้องการไว้ตรงกลางสี่เหลี่ยม
- 3) เขียนชื่อวัตถุดิบแต่ละชนิดพร้อมทั้งเปอร์เซ็นต์โปรตีน ไว้ที่มุมด้านซ้ายมือมุมละชนิด แล้วใส่ค่าไว้ที่มุมทแยง ซึ่งอยู่ด้านขวามือ

4) ความแตกต่างที่ได้นี้คืออัตราส่วนผสมของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด นำมาคำนวณให้เป็นอาหารผสม 100 กิโลกรัม ก็จะได้อาหารผสมที่มีโปรตีนตามความต้องการ แสดงในตัวอย่าง

ตัวอย่าง หาอัตราส่วนผสมระหว่างข้าวโพด (โปรตีน 8%) และกากถั่วเหลือง (โปรตีน 44%) เพื่อให้ได้อาหารผสมที่มีโปรตีน 20 %



ดังนั้น จะได้อาหารผสมรวม 36 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย ข้าวโพด 24 ส่วน และ กากถั่วเหลือง 12 ส่วน ซึ่งเมื่อคิดเป็นอาหารผสม 100 ส่วน จะมี

$$\text{ข้าวโพด} = \frac{24}{36} \times 100 = 66.7 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{กากั่วเหลือง} = \frac{12}{36} \times 100 = 33.3 \text{ กิโลกรัม}$$

2.10.2 การคำนวณสูตรอาหารโดยใช้วัตถุดิบมากกว่า 2 ชนิด เป็นส่วนประกอบ

1) วิธีการเปียสัน-สแควร์ (Person's square method)

โดยทั่วไปแล้วในสูตรอาหารจะประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป การคำนวณสูตรอาหารโดยวิธีการเปียสัน-สแควร์ มีขีดจำกัดว่าต้องหาจากส่วนผสมของวัตถุดิบ 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นหากจะใช้วัตถุดิบมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป จะต้องนำวัตถุดิบดังกล่าวมาผสมในสัดส่วนที่ต้องการให้ได้เป็นวัตถุดิบผสม 2 ชนิดก่อน แล้วจึงนำมาเทียบกลับเพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบแต่ละชนิดต่อไป (นพวรรณ ชมชัย, 2542)

ตัวอย่าง คำนวณสูตรอาหารไก่ไข่ให้มีโปรตีน 16% โดยใช้หัวอาหารไก่ไข่ (โปรตีน 40%) รำละเอียด (โปรตีน 12%) และข้าวโพด (โปรตีน 8%)

ขั้นที่ 1 กำหนดส่วนผสมของรำละเอียด : ข้าวโพดให้มีอัตราส่วน = 1:2 หา % โปรตีน ของวัตถุดิบดังนี้

$$\text{รำละเอียด ให้โปรตีน} = \frac{1}{3} \times 12 = 4\%$$

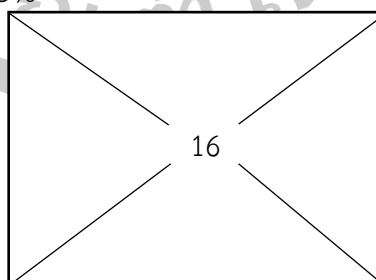
$$\text{ข้าวโพด ให้โปรตีน} = \frac{2}{3} \times 8 = 5.3 \%$$

$$\text{รวมวัตถุดิบมีโปรตีน} = 4 + 5.3 = 9.3\%$$

ขั้นที่ 2 ใช้วิธีการเปียสัน-สแควร์ ดังนี้

วัตถุดิบ 9.3%

$$40 - 16 = 24$$



หัวอาหาร 40%

$$16 - 9.3 = 6.7 \text{ ส่วน}$$

รวม 30.7 ส่วน

ดังนั้น จะได้อาหารผสมรวม 30.7 ส่วน ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบ 24 ส่วน และหัวอาหาร 6.7 ส่วน ซึ่งเมื่อคิดเป็นอาหารผสม 100 กิโลกรัม แล้วจะมี

$$\text{วัตถุดิบ} = \frac{24}{30.7} \times 100 = 78.2 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{หัวอาหาร} = \frac{6.7}{30.7} \times 100 = 21.8 \text{ กิโลกรัม}$$

ขั้นที่ 3 นำวัตถุดิบมาเทียบกลับเพื่อหาปริมาณของรำละเอียดและข้าวโพด

$$\text{ใช้รำละเอียด} = \frac{1}{3} \times 78.2 = 26.1 \text{ กิโลกรัม}$$

$$\text{ใช้ข้าวโพด} = \frac{2}{3} \times 78.2 = 52.1 \text{ กิโลกรัม}$$

ดังนั้น จะได้สูตรอาหารดังนี้

$$\text{หัวอาหาร 21.8 กิโลกรัม ให้โปรตีน} = 21.8 \times \frac{40}{100} = 8.72 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{รำละเอียด 26.1 กิโลกรัม ให้โปรตีน} = 26.1 \times \frac{12}{100} = 3.13 \text{ ก.ก.}$$

$$\text{ข้าวโพด 52.1 กิโลกรัม ให้โปรตีน} = 52.1 \times \frac{8}{100} = 4.17 \text{ ก.ก.}$$

รวมอาหารผสม 100 กิโลกรัม มีโปรตีน = 16.02 กิโลกรัม หรือคิดเป็นอาหารผสมที่มีโปรตีน 16.02%

2.11 การตรวจสอบ และคำนวณอัตราการเติบโตของแมลง

การใช้วิธีการคำนวณเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของแมลง และอาหาร โดยการตรวจสอบผลการทดลองเมื่อแมลงอยู่ในช่วงระยะเต็มวัยสุดท้าย หรือพร้อมที่จะขยายพันธุ์ต่อไป นิยมใช้การคำนวณ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนอาหาร (Feed Conversion Ratio; FCR) ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงอาหาร ที่กินเข้าไปในหน่วยของสารในร่างกาย (Efficiency of conversation of

ingested ; ECI) และประสิทธิภาพของการเปลี่ยนอาหารที่ย่อย(Efficiency of Donversion of Digested Material to Insect Biomass ; ECD) ซึ่งมีรายละเอียดของการคำนวณสูตรดังต่อไปนี้

2.11.1 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนั (Feed Conversion Ratio; FCR)

อัตราการแลกเนื้อ หรือ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Feed Conversion Ratio; FCR) ในสูตรการคำนวณนี้ ในทางด้านปศุสัตว์ทั่วไป คือ การคำนวณเป็นปริมาณอาหาร (กิโลกรัม) ที่ต้องการเพื่อให้ได้น้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัมของสัตว์ที่ผลิต แต่ในส่วนของงานด้านกีฏวิทยา มักนิยมใช้ประสิทธิภาพของการแปลงอาหารที่บริโภคนี้ในรูปแบบสูตร ECI ซึ่งเป็นมาตรการในการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว สสารแห้ง หรือมวลชีวภาพและในกรณีของ FCR ในแมลงจะถูกใช้ในการตรวจวัดของน้ำหนักสด หรือน้ำหนักแห้งโดยหน่วยถูกกำหนดให้เป็น กรัม หรือมิลลิกรัม หรือหน่วยย่อยที่เล็กกว่านั้น (ธิมากรณ จันทร์สม, 2563) ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$\text{สูตรอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน(กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่ม(กรัม)}}$$

2.11.2 ประสิทธิภาพของการแปลงอาหารที่กินเข้าไปเป็นหน่วยของสารอาหารในร่างกาย (Efficiency of conversation of ingested ; ECI)

เป็นการคำนวณประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว ในแมลงมีค่าตรงข้ามกับอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Oonincx et al., 2015) โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{สูตรประสิทธิภาพในการใช้อาหาร} = \frac{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่ม(กรัม)}}{\text{ปริมาณอาหารที่กิน(กรัม)}} \times 100$$

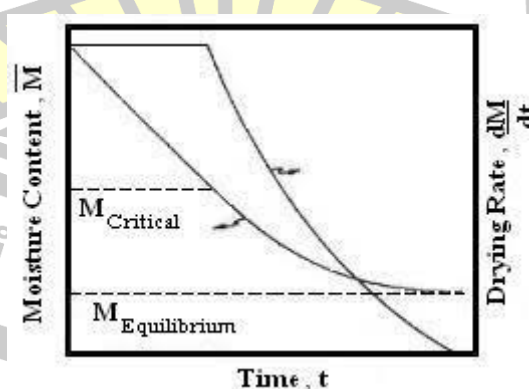
2.12 การอบแห้ง (Drying)

การอบแห้ง (Drying) เป็นกระบวนการแปรสภาพของเหลว ของเหลวกึ่งแข็ง หรือแม้กระทั่งของแข็ง ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายในรูปของแข็งโดยการระเหยของเหลว (ซึ่งในกรณีส่วนใหญ่คือน้ำ แต่ในบางกรณีอาจเป็นตัวยละลาย) ส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดออกจากวัสดุโดยการให้ความร้อน ทั้งนี้ อาจยกเว้นกรณีการอบแห้ง แบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) ซึ่งเป็นกระบวนการผู้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดรวมสาม (Triple point) รองของเหลวที่ต้องการ ขจัดออก ในกรณีดังกล่าว การ

อบแห้งเกิดขึ้นโดยการระเหยของของแข็ง(เช่นน้ำแข็ง) ไปเป็น ไอโดย ตรง โดยไม่ผ่านวัฏภาคของเหลว โดยนิยามดังกล่าวข้างต้น การอบแห้ง จึงเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากการระเหย (Evaporation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนของเหลวให้กลายเป็นของเหลว ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น หรือแตกต่างจากกระบวนการขจัดน้ำโดยวิธีทางกล(Mechanical Dewatering) เช่น การกรอง(Filtration) การหมุนเหวี่ยง (centrifuge) การตกตะกอน (Sedimentation) หรือแม้กระทั่งแตกต่างจากกระบวนการที่อาจเรียกว่า การทำ แห้งของเหลว หรือก๊าซโดยใช้ Molecular Sieve ซึ่งแท้จริงแล้ว เป็นกระบวนการซึ่งเรียกว่าการดูดซับ ในการที่จะเรียกกระบวนการหนึ่งๆ ว่า เป็นกระบวนการอบแห้งได้นั้น จำเป็นต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 2 ประการคือ การเปลี่ยนวัฏภาค และการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ ซึ่งของแข็งเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ (สักมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.12.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งวัสดุโดยทั่วไป จะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำ อยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ และถ้าอุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมของอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลง อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอที่ผิววัสดุเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิที่ผิวจะสูงขึ้น และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ดังภาพที่ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศคงที่ ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า “ความชื้นวิกฤติ”



ภาพที่ 17 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และลดลง

1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying – rate period)

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การ ถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุ กับ อากาศที่เกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆผิววัสดุเท่านั้น และน้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก ในการ อบแห้ง ซึ่งจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของวัสดุก่อน ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้งคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มของ อากาศนิ่งมี ความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อน และมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแส อากาศที่ไหลผ่านอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อลดค่าความชื้น สัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมมัตว์ที่ผิววัสดุ และ อัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอิสระ มีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้นและ การ ถ่ายเทมวลเกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำ ที่ผิว ของกระเปาะเปียกและที่ อากาศรอบนอก (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540)

2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying – rate period)

เมื่อปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้น เฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดภายในผิว และเนื้อวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุมายังผิว ซ้ำกว่ากันพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูก ควบคุมด้วยการต้านทานของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุมีค่า สูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งช่วงนี้คือ อุณหภูมิของ อากาศอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้ง เทียบกับเวลาภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่(อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็ว)

2.12.2 หลักการอบแห้งเบื้องต้น

การอบแห้ง คือกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง เพื่อไล่ความชื้นออก โดยการระเหยน้ำ ในการอบแห้งวัสดุทั่วไปโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยความร้อน จะมีการถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยังผิววัสดุความร้อนส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ โดยไอน้ำ จะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศและถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำ อยู่่น้อยอุณหภูมิและ ความชื้น ของไอน้ำ ที่ผิวจะคงที่ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ ด้วยถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำ ลดลง เหลือน้อยอุณหภูมิ และความชื้นของไอน้ำ ที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิของ วัสดุจะสูงขึ้นและความ

เข้มข้นของไอน้ำ จะลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงและความชื้นที่ อยู่ระหว่างการเปลี่ยนแปลง จากอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ

2.12.3 ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้ง คือ กระบวนการการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยัง วัสดุที่ขึ้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยโดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย วัสดุอบแห้งมีมากมายหลายชนิด แต่ที่จะกล่าวต่อไปจะเกี่ยวข้องกับการอบแห้งเมล็ดพืช และอาหารเท่านั้น ประโยชน์ของการอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารอาจสรุปได้ตามลำดับความสำคัญ ต่อไปนี้

1) เพื่อการถนอมรักษาอาหาร อาหารที่แห้งแล้วสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสีย เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อย

2) เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนัก อาหารที่แห้งแล้วจะมีปริมาตรและน้ำหนักลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่ง

3) เพื่อช่วยให้กระบวนการการผลิตดีขึ้น ในกรณีนี้อาจจะไม่จริงเสมอไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตนั้น ๆ ในกรณีของเมล็ดพืชเกษตรกรสามารถที่จะเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดพืชยังมีความชื้นสูงอยู่ทำให้ลดการสูญเสียของเมล็ดพืชเนื่องจากการร่วงหล่นก่อน ระหว่างและหลังเก็บเกี่ยว การเก็บเกี่ยว ที่เร็วขึ้นอาจช่วยให้เกษตรกรสามารถปลูกพืชครั้งที่สองอย่างได้ผลการอบแห้งที่ถูกหลักยังสามารถ ช่วยให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพืช ทำให้สามารถนำไปเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมล็ดพืชที่อบแห้งแล้วมีคุณภาพสูงและสามารถเก็บ รักษาไว้ได้นานทำให้เกษตรกรสามารถรอเวลา ขายในขณะที่ผลิตผลมีราคาดี (ณัฐพล กระจำง, 2560)

2.12.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

การทำแห้ง คือ การเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหารปัจจัยใดๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายจะมีผลต่ออัตราการทำให้แห้ง (สราวุฒิ ดาแก้ว และคณะ, 2560)

1) ธรรมชาติของอาหาร

อาหารเนื้อโปร่งที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหารแบบบ้านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งเร็วกว่าอาหารเนื้อแน่น อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะเหนียวเหนอะหนะกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงทำให้แห้งช้า อาหารที่มีการลวก นวด คลึง ทำให้เซลล์แตกจะอบแห้งได้เร็วขึ้น

2) ขนาดและรูปร่าง

ที่มีผลต่อการอบแห้งคือ พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่นรูปร่างเหมือนกันมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากกว่าจะแห้งได้เร็วกว่าแต่ทั้งนี้ต้องคำนึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่จะเกิดการเคลื่อนย้าย

ไอน้ำ ออกไปได้ ถ้าชื้นเล็กน้อย ทับถมกันจะระเหยได้เฉพาะพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ จึงส่งผลให้ การทำแห้งเกิดได้ช้าทั้ง ๆ ที่พื้นที่ผิวด่อน้ำหนักรวม

3) ตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ในเตา

น้ำในผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่าหรือสัมผัสลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า

4) ปริมาณต่อถาด

ถ้าปริมาณต่อถาดมากเกินไปอาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อนหรือได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนน้อยทำให้ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

5) ความสามารถในการรับความชื้นของอากาศร้อน

อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะรับไอน้ำเพิ่มได้น้อยจึงมีผลทำให้ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่

6) อุณหภูมิของอากาศร้อน

ถ้าอากาศร้อนมีความชื้นคงที่การเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำจึงมีผลต่อการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อการอบในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงด้วย

7) ความเร็วของลมร้อน

ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายไอน้ำได้ดีขึ้น

2.12.5 วิธีการอบแห้ง

การอบแห้งโดยอาศัยธรรมชาติแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ

1) การอบแห้งโดยอาศัยแสงแดดโดยตรง ส่วนใหญ่ใช้ความร้อนจากแสงแดดหรืออาศัย การผึ่งลม อาหารที่ทำให้แห้งโดยวิธีนี้ได้แก่ปลา เนื้อสัตว์เมล็ดธัญพืช ตลอดจนผลไม้บางชนิด เช่น กล้วยตาก วิธีนี้นับ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายภายในประเทศที่ค่อนข้างยากจน และมีแสงแดดเพียงพอ เป็นวิธีที่ค่อนข้างถูกแต่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอัตราเร็วในการอบแห้งได้

2) การอบแห้งด้วยตู้อบลังงานแสงอาทิตย์ วิธีทำให้อาหารแห้งโดยอาศัยธรรมชาติ ด้วยการตากแดดนั้น มีปัญหาหลายเรื่องของการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อน ซึ่งเป็นผลเสียต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้ และประสิทธิภาพในการอบแห้งด้วยการตากแดดมักต่ำ ดังนั้นจึงมีการ

พัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นโดยตู้อบดังกล่าวนี้จะอาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ได้ดี อยู่ในตู้อบ เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการทำให้แห้งได้เร็วขึ้น และในตำแหน่งเดียวกัน ตู้ดังกล่าวจะลดปัญหาการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น แมลง ฝุ่น เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ อาหารแห้งที่ได้ มีคุณภาพและความสะอาดดีขึ้นจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตากแดด (ชมภู ยิ้มโต, 2550)

2.13.4 การอบแห้งด้วยเครื่องจักรกล

วิธีการนี้มีการนำเอาเทคนิคและหลักวิชาการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยอย่างมาก ซึ่งอาศัยการส่งความร้อนเข้าไปในชิ้นอาหารเพื่อทำให้น้ำ หรือความชื้นกลายเป็นไอระเหยออกไปจากผิวหน้าอาหาร โดยความร้อนที่ส่งเข้าไปอาจจะเป็นการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสีก็ได้แต่โดยทั่วไปการทำให้แห้งด้วยเครื่องจักรกล มักนิยมใช้หลักการนำ ความร้อน และการพาความร้อนเป็นส่วนใหญ่ (ณัฐพล กระจำจ, 2560)

2.13.5 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนหรือลมร้อน

การอบแห้งด้วยอากาศร้อนหรือลมร้อนเป็นการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการทำแห้ง โดยอากาศร้อนจะไหลผ่าน นวัตกรรมให้ความร้อนเป็นตัวให้ความร้อน แล้วไหลผ่านชิ้นอาหารเพื่อทำแห้งเมื่ออากาศไหลผ่านผิวหน้าอาหารความร้อนจากอากาศร้อนถ่ายโอนไปที่ผิวอาหารทำให้น้ำในอาหารระเหยออกมาสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอระหว่างผิวหน้าอาหาร และภายในชิ้นอาหารโดยภายในชิ้นอาหารมีความดันไอสุงกว่า ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหาร ทำให้เกิดแรงดัน เพื่อไล่น้ำ ออกจากอาหาร(วิไล รังสาดทอง, 2546)

2.12.6 การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้ง

การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้งมีหลากหลายหลักการ ที่นำไปใช้ในการจำแนกประเภทเครื่องอบแห้ง ไม่ว่าจะเป็นลักษณะการทำงาน วิธีการให้ความร้อนกับวัสดุ ความดันในการอบแห้ง ตัวกลางการอบแห้งในกรณีเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน อุณหภูมิอบแห้ง จำนวนขั้นตอนเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้ง จากที่กล่าวข้างต้น ในที่นี้เป็นการนำหลักเกณฑ์ของ (Mujumdar, 2007; Van't Land, 1991) มานำเสนอรวบรวม แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้ง (สัคมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

เกณฑ์การจำแนกชนิด	ประเภทของเครื่องอบแห้ง
ลักษณะการทำงาน (Mode of operation)	-แบบเป็นกะ (Batch) -แบบต่อเนื่อง (Continuous)*
วิธีการให้ความร้อนกับวัสดุ (Heat input Type)	-โดยการนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี การใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (คลื่นไมโครเวฟ) -แบบต่อเนื่อง (เป็นชนิดที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม)หรือแบบ เป็นห้วง(intermittent
สถานะของวัสดุในการอบแห้ง (State of material in drying)	-วัสดุอยู่กับที่ (Stationary) -วัสดุเคลื่อนที่ในเครื่องอบแห้ง (Moving, Agitated or Dispersed)
เกณฑ์การจำแนกชนิด	ประเภทของเครื่องอบแห้ง
ความดันในห้องอบ	-ความดันบรรยากาศ (Atmospheric) -ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (Vacuum)*
เกณฑ์การจำแนกชนิด	ประเภทของเครื่องอบแห้ง
ตัวกลางการอบแห้ง (ในกรณี เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน)	-อากาศร้อน* -ไอน้ำร้อนแบบยวดยิ่ง(Superheated Steam) -ก๊าซร้อนอื่นๆ
อุณหภูมิอบแห้ง	-ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือด -สูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือด -ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง
จำนวนขั้นตอน(Stages)	-ขั้นตอนเดียว (Single Stage)* -หลายขั้นตอน (Multistage)
เวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้ง	-สั้น (น้อยกว่า 1 นาที) -ปานกลาง (1-60 นาที) -ยาว (มากกว่า 60 นาที)

*เป็นชนิดที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม

นอกจากเกณฑ์การจำแนกประเภทเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 2 ยังอาจจำแนก
เครื่องอบแห้งตามวิธีการให้ความร้อนกับวัสดุที่อยู่ภายในเครื่องออกเป็น 2 ชนิดคือ

1) เครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง (Direct dryers)

เครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง (Direct dryers) หรือเครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน (Convective dryers) โดยจะให้วัสดุได้รับความร้อนโดยตรงจากตัวกลางการอบแห้งที่ผ่านวัสดุที่ต้องการอบแห้ง เครื่องอบชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรม อาจกล่าวได้ว่าเครื่องอบแห้งในอุตสาหกรรมมากกว่าร้อยละ 85 เป็นเครื่องอบแห้งชนิดนี้ แม้ว่าประสิทธิภาพอุณหภาพ (Thermal efficiency) ของเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะค่อนข้างต่ำ เนื่องจากไม่สามารถที่จะนำความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (ความชื้น) ที่ถ่ายเทไปกับตัวกลางการอบแห้งที่ไหลออกจากเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปแล้วเครื่องอบแห้งชนิดนี้มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง (อาจใช้น้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางการอบแห้งได้เช่นเดียวกัน ซึ่งมีข้อดีที่สามารถนำเอาความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอลงกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ) แม้ว่าอาจนำก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Flue Gases) ชนิดต่างๆ มาใช้เป็นตัวกลางการอบแห้งเช่นกัน แต่การใช้ก๊าซร้อน ที่ได้จากการบอไม่เชื้อเพลิงโดยตรง อาจทำให้อาหารเกิดการปนเปื้อนสารเคมี ที่อาจเป็นสารก่อมะเร็ง และในกรณีที่วัสดุที่ต้องการอบแห้งเป็นวัสดุ ที่อาจติดไฟได้ง่าย (เนื่องจากมีตัวทำละลายอินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่ต้องการขจัดออกแทนที่จะเป็นน้ำ ดังเช่นการอบแห้งทั่วไป) อาจใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจน เป็นตัวกลางในการอบแห้งแทนได้ (สักรมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

เนื่องจากการใช้งานเครื่องอบแห้งชนิดนี้จำเป็นต้องให้ตัวกลางการอบแห้งปริมาณมาก ไหลผ่านเครื่องอบแห้ง จึงส่งผลให้อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิต และที่ใช้ทำความสะอาดตัวกลางการอบแห้ง ตลอดจนอุปกรณ์ที่อาจต้องใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวกลางการอบแห้งมีขนาดใหญ่และราคาแพงจนในบางครั้งอาจมีราคาแพงกว่าเครื่องอบแห้ง ชนิดอื่น

2) เครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม (Indirect dryers)

เครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม (Indirect dryers) หรือเรียกอีกอย่างว่าเครื่องอบแห้งแบบนำความร้อน (Conductive dryers) เป็นเครื่องอบแห้งซึ่งอาศัยหลักการของการนำความร้อน ในการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางการให้ความร้อน (Heat transfer medium) ไปยังวัสดุ โดยตัวกลางการให้ความร้อนและวัสดุไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง จึงมักอาศัยสุญญากาศ (Vacuum) ในการดึงเอาความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุออกไปจากห้องอบแห้ง ทั้งนี้เพื่อมิให้ห้องอบแห้งอยู่ในสภาวะอิ่มตัวกับไอของความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุ จนไม่สามารถทำการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพในบางกรณี เช่น การระเหยตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากวัสดุ อาจใช้การเป่าอากาศ (หรือก๊าซอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน) ที่ความเร็วต่ำผ่านห้องอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุ แทนการใช้สุญญากาศได้ (สักรมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

ในแง่ของอุณหภูมิผนังซึ่งกั้นระหว่างตัวกลางการให้ความร้อนกับวัสดุ(หรืออีกนัยยะหนึ่งก็คือพื้นผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน) นั้นอาจมีค่าอยู่ระหว่าง -40°C เช่น ในกรณีของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งในช่วงแรก ไปจนถึง 300°C เช่นในกรณีที่ใช้ก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นตัวกลางการให้ความร้อน และเนื่องจากในเครื่องอบแห้งชนิดนี้ไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงของตัวกลางการให้ความร้อน และวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งอาจเป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย ถึงไม่มีความเสี่ยงในการระเบิดหรือติดไฟในเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้การนำเอาตัวละลายอินทรีย์ที่ระเหยจากวัสดุกลับมาใช้ใหม่ยังทำได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องทำการควบแน่นอากาศ(หรือตัวกลางอื่น) ในปริมาณมาก การกำจัดฝุ่นก็ทำได้ง่ายเช่นเดียวกัน นอกจากนี้การเดินเครื่องอบแห้งภายใต้สภาวะสูญญากาศยังมีข้อดีในแง่ที่ว่าจุดเดือดของของเหลวที่ต้องการขจัดจากวัสดุจะมีค่าลดลง ทำให้สามารถแห้งวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่อาจเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เช่น ผัก ผลไม้ วัสดุชีวภาพ หรือผลิตภัณฑ์ยา ได้ยามีประสิทธิภาพและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การใช้แหล่งความร้อนดังกล่าวข้างต้น ช่างอาจให้ความร้อนกับวัสดุที่ต้องการอบแห้งได้โดยการเปลี่ยนรังสีความร้อนหรือใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น คลื่นไมโครเวฟ (Mujumdar, 2007)

2.12.7 เครื่องอบแห้งสำหรับชิ้นของแข็ง (Dryers for solid pieces) และเครื่องอบแห้งสำหรับอนุภาคของแข็ง (Dryers for particulate solids)

1) เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryers)

การอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นชิ้น เป็นก้อน หรือเป็นแท่ง ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้โดยทั่วไปของอาหารและวัสดุชีวภาพ นิยมใช้เครื่องอบแห้งแบบถาดมากที่สุด เครื่องอบแห้งแบบนี้ อาจมีลักษณะเป็นตู้ซึ่งภายในจะเรียงเป็นชั้นสำหรับใส่ถาดบรรจุวัสดุที่ต้องการอบแห้ง แสดงดังภาพที่ 18 หรืออาจเป็นห้องอบแห้งที่สามารถ เช่นรถเข็น (Trolley) ซึ่งวางเรียงใส่วัสดุเข้าไปได้ ภายในห้องอบแห้งจะมีการติดตั้งพัดลม เพื่อหมุนเวียนอากาศร้อน(ซึ่งเป็นตัวกลางการอบแห้งที่นิยมใช้มากที่สุด) เพื่อให้วัสดุได้รับพลังงานความร้อนอย่างทั่วถึงไม่ว่าจะเป็นที่อยู่บริเวณใดของห้องอบแห้ง ด้วยเหตุนี้การออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศให้ทำงานได้ดังกล่าวนั้นอาจทำได้หลายวิธี เช่น การเดินพัดลมย้อนกลับเป็นบางจังหวะ ในกรณีที่การหมุนเวียนอากาศร้อนไม่ดีพอ วัสดุที่สัมผัสกับอากาศร้อนมากกว่าย่อมแห้งได้เร็วกว่า ทำให้วัสดุแห้ง(หรือมีความชื้น) ไม่สม่ำเสมอ นำไปสู่ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ได้ ทำให้การหมุนเวียนอากาศในห้องอบแห้งที่ดีนั้น คือ หัวใจหลักของการอบแห้งประเภทนี้ (สักรมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

จุดเด่นของเครื่องอบแห้งแบบถาด คือ ความสามารถในการอบแห้งวัสดุได้หลากหลาย ด้วยสามารถทำการอบแห้งวัสดุที่มีรูปร่าง ขนาด หรือพฤติกรรมในการอบแห้งที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้เพราะเครื่องอบแห้งประเภทนี้ไม่มีข้อจำกัดในแง่ของเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งวัสดุ

สามารถใช้ได้ทั้งกับวัสดุที่ต้องใช้เวลานาน หรือใช้เวลาสั้นในการอบแห้ง สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานได้ง่าย แล้วเสร็จไม่ต้องมีการเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการอบแห้ง อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งแบบถาดก็มีข้อเสียในแง่ของค่าใช้จ่ายที่สูง และเวลาที่ต้องใช้ในการลำเลียงวัสดุเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของเครื่องอบแห้งประเภทนี้ คือ ต้องทำการอบแห้งแบบเป็นกะเท่านั้น ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งในการออกแบบและเลือกเครื่องอบแห้งประเภทนี้ คือ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการหมุนเวียนของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้ง ซึ่งได้กล่าวไปในข้างต้น



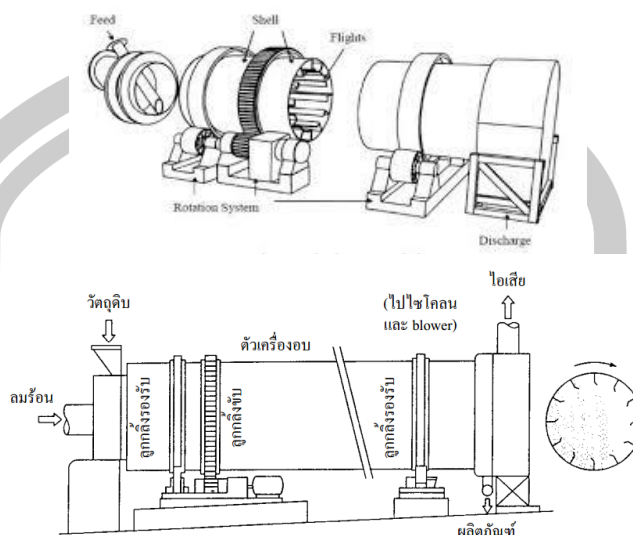
ภาพที่ 18 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryers)

ที่มา: (onlines-product.com, 2566)

2) เครื่องอบแห้งแบบทอหมุน (Rotary Dryers)

เครื่องอบแห้งแบบทอหมุน แสดงดังภาพที่ 19 นิยมใช้กัน โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมประกอบด้วยท่อทรงกระบอก ซึ่งวางทำมุมเอียงเล็กน้อยเทียบกับแนวระดับและหมุนรอบตัวเองอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างการอบแห้ง วัสดุจะถูกป้อนเข้าไปสู่การอบแห้งผ่านปลายทางหมุนด้านที่ยกสูงขึ้น จากนั้นวัสดุจะเคลื่อนที่ เครื่องอบแห้งไปตามจังหวะการหมุนของท่อ โดยมีใบตัก คอยช่วยในการกวาดและลำเลียงวัสดุให้เคลื่อนที่ไปตามแนวความยาวของท่อ ตามจังหวะการหมุนของท่อ เมื่อวัสดุเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณด้านบนของท่อ ก็จะตกลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกในลักษณะคล้ายกับน้ำตก ในช่วงเวลานี้เอง วัสดุจะสัมผัสกับตัวกลางการอบแห้ง ซึ่งในผ่านมาทำให้สามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้ ด้วยการไหลของตัวกลางการอบแห้งอาจจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (Concurrent) หรือสวนทางกัน (Countercurrent) กับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุตามแนวความยาวของท่อหมุนก็ได้ อย่างไรก็ตามหากวัสดุที่ต้องการอบแห้งเป็นวัสดุที่อาจเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ก็ควรให้ตัวกลางการอบแห้งไหลในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของวัสดุ เพื่อให้ตัวกลางการอบแห้งที่ยังคง

มีอุณหภูมิสูง (ขาเข้าเครื่องอบแห้ง) ได้สัมผัสกับวัสดุที่ยังคงมีความชื้นสูง อุณหภูมิของวัสดุจะได้นำเพิ่มสูงขึ้นมากจนเกินไป



ภาพที่ 19 เครื่องอบแห้งแบบทอหมุน (Rotary dryers)

ที่มา: (thaiscience.info/Journals/Article/EJCM/10989241.pdf, 2566)

เครื่องอบแห้งแบบทอหมุนนี้เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่เป็นเม็ด ซึ่งอาจมีความหลากหลายของขนาดหรือรูปทรงได้ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถออกแบบไปดัดให้เหมาะกับวัสดุแต่ละชนิดที่ต้องการอบแห้งได้ ในกรณีที่วัสดุอาจเกิดการเกาะติดกันและกลายเป็นก้อนวัสดุ (Lump) เมื่อขึ้นภายในเครื่องอบแห้ง อาจจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์หรือเครื่องมือเพื่อช่วยในการตีหรือกระจายก้อนวัสดุให้ออกจากกันเพื่อป้องกันปัญหาการอุดตันภายในเครื่องอบแห้ง

ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุในเครื่องอบแห้งที่มีการกวาดหรือตัดวัสดุขึ้นและปล่อยให้ตกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก เครื่องอบแห้งแบบทอหมุนจึงไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่แตกหักได้ง่าย (เช่น อาหารสัตว์แบบเม็ด) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทอหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างใหญ่ (ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการผลิตสูง) โดยทั่วไปแล้ว วัสดุมักจะอยู่ภายในเครื่องอบแห้งแบบทอหมุนประมาณ 10-60 นาที ในกรณีที่ต้องการให้วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้งนานขึ้น (เพื่อทำการอบแห้งในช่วงอัตราการผลิตลดลง) อาจออกแบบให้ทอหมุนมีขนาด หรือทางปลายด้านที่วัสดุเปียกเข้าสู่เครื่องอบแห้ง และเพิ่มเส้นผ่าศูนย์กลางของทอหมุนทางด้านปลายขาออกของผลิตภัณฑ์ให้ใหญ่ขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว เครื่องอบแห้งแบบทอหมุนมักเป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง เนื่องจากวัสดุที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง ได้รับความร้อนโดยตรงจากตัวกลางการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม อาจออกแบบให้เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม โดยติดตั้งท่อไอน้ำ

(Steam tubes) ไวไอน้ำเพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุได้รับความร้อนโดยการสัมผัสกับผนังท่อไอน้ำ (ความร้อนถ่ายเทผ่านผนังท่อไอน้ำโดยการนำ) แทนการรับความร้อนโดยตรงจากตัวกลางการอบแห้ง การปิดบังท่อไอน้ำในลักษณะดังกล่าว นั้นนอกจากจะมีประโยชน์ในแง่การเพิ่มประสิทธิภาพอุณหภูมิของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน สามารถใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิดและเหมาะสำหรับการผลิตอย่างต่อเนื่องที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งประเภทนี้มีประสิทธิภาพคุณภาพค่อนข้างต่ำ (ประมาณร้อยละ 30-50 ในกรณีที่เป็เครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรง) นอกจากนี้ ยังมีราคาและค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องสูงและไม่เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่แตกหักได้ง่าย (สัคมณ เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

3) เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (Conveyer dryers)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร สำหรับการอบแห้งวัสดุที่เป็นชิ้น ซึ่งมีลักษณะรูปร่างต่างๆ ที่ไม่เหมาะสมที่จะทำการอบแห้งด้วยวิธีอื่น เช่น การอบแห้งแบบท่อหมุน เนื่องจากอาจทำให้วัสดุต่างๆ เกิดการแตกเสียหายได้ ตัวอย่างของวัสดุที่นิยมใช้อบแห้งแบบสายพานในการอบแห้ง ได้แก่ ชิ้นผลไม้ ขนมขบเคี้ยว อาหารแบบนี้ ซึ่งอาจเตรียมโดยการอัดสีมาก่อนจะนำมาผ่านกระบวนการอบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบสายพาน มีส่วนประกอบหลักคือสายพานเจาะรู ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิมหรือพลาสติกซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตอาหาร เมื่อ โดยสายพานดังกล่าว จะรับวัสดุที่ต้องการอบแห้งเข้าทางด้านใดด้านหนึ่งของเครื่องอบแห้ง อากาศร้อน หรือตัวกลางแห้งอื่นเช่น ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะไหลผ่านรูเจาะของสายพานขึ้นไปสัมผัสกับวัสดุที่อยู่บนสายพาน ทำให้วัสดุที่มีความชื้นลดลง ขณะที่เคลื่อนที่ไปตามความยาวของเครื่องอบแห้ง ในแง่ของการออกแบบทิศทางการไหลของตัวกลางการอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุ ในเครื่องอบแห้งนั้นอาจทำได้หลายวิธี เช่น ออกแบบให้ตัวกลางการอบแห้งและวัสดุมีทิศทางการไหลและการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันสวนทางกัน หรือตั้งฉากกัน อย่างไรก็ตาม ในกรณีของอาหารและวัสดุชีวภาพซึ่งอาจเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง มักนิยมออกแบบให้ตัวกลางการอบแห้งไหลในทิศทางเดียวกันกับวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของวัสดุสูงเกินไปกว่าค่าสูงสุดที่จะทำให้เกิดความเสียหายได้

โดยภาพรวมเครื่องอบแห้งแบบสายพาน ในกรณีที่วัสดุต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานในการอบแห้ง โดยทั่วไปแล้วมักออกแบบให้วัสดุอยู่ในเครื่องอบแห้งประมาณ 10-60 นาที สายพานอาจทำการออกแบบ ให้มีชั้นของพานมากกว่า 1 ชั้นได้ อย่างไรก็ตาม ออกแบบระยะห่างระหว่างชั้น

ไม่ให้มีค่าสูงมากเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย ในขณะที่ตกจากสายพานชั้นบน มาอย่างสายพานชั้นล่าง นอกจากนี้ ควรออกแบบให้สามารถถอดทำความสะอาดสายพาน และ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้สะดวกด้วย ข้อควรคำนึงอีกประการหนึ่งในการออกแบบเครื่องอบแห้งประเภทนี้ คือ ต้องทำการ ให้มีการกระจาย และไหลเวียนของตัวกลางการอบแห้งอย่างสม่ำเสมอภายในเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งแบบสายพาน เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นไม่สูงมาก จนเกาะติดกันเป็นก้อน และไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็กมากๆ เพราะอาจปลิวไปกับอากาศร้อนที่เป่าเข้ามา จากทางด้านล่างของสายพาน นอกจากนี้ไม่ควรออกแบบหรือเดินเครื่องอบแห้งให้มีความหนาของชั้นวัสดุมากนัก โดยทั่วไปแล้วไม่ควรมีความหนาเกินกว่า 10-15 เซนติเมตร เนื่องจากทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้น ของวัสดุที่มีความสูงต่างๆกันได้ (โดยวัสดุที่อยู่ในระดับใกล้กับสายพาน ก็จะแห้งเร็วกว่าวัสดุที่อยู่ในระดับที่ห่างจากสายพานขึ้นไป) ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อาจทำการออกแบบให้มีการพลิกกลับของชั้นวัสดุ โดยอาจมีอุปกรณ์ ซึ่งกวาดและกลับชั้นวัสดุ ให้เกิดการพลิกตัว ติดตั้งไว้เป็นระยะๆ ในเครื่องอบแห้ง เลยเนี่ยและในกรณีที่เครื่องอบแห้งมีสายพานมากกว่า 1 ชั้น การพลิกกลับของชั้นวัสดุจะเกิดขึ้นเองเมื่อวัสดุตกจากสายพานชั้นบนมายังสายพานชั้นล่าง

จุดเด่นอีกประการหนึ่งของเครื่องอบแห้งแบบสายพาน คือ สามารถออกแบบโดยแบ่งเครื่องอบแห้งออกเป็นส่วนๆ เช่น ในส่วนแรกของเครื่องอบแห้งเป็นส่วนของการให้ความร้อนและอบแห้ง ไม่ขนาดส่วนที่สองของเครื่องอบแห้งเป็นส่วนลดอุณหภูมิของวัสดุ (โดยการใช้อากาศแวดล้อมหรืออากาศเย็นเป่าเข้าไปในเครื่องอบแห้งแทนการใช้ความร้อน) ก่อนจะออกจากเครื่องอบแห้งเพื่อเตรียมสำหรับบรรจุหรือเก็บรักษาต่อไป (สักรกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)



ภาพที่ 20 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน (Conveyer dryers)

ที่มา: (th.made-in-china.com)

4) เครื่องอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared dryers)

เครื่องอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรด ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรดใกล้ และเครื่องอบแห้งแบบใช้รังสีอินฟราเรดไกล ตามขนาดความยาวคลื่น รังสีอินฟราเรด ซึ่งใช้ในการอบแห้ง คือ 0.75-3.00 มิลลิเมตรสำหรับรังสีอินฟราเรดใกล้ และ 25-100 มิลลิเมตร สำหรับรังสีอินฟราเรดไกล เป็นเครื่องอบแห้งประเภทหนึ่ง ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรม เพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์เซรามิกซ์ สารเคมี กระจก ตลอดจนอาหารและขนมขบเคี้ยวหลายชนิด ทั้งนี้การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด มีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ต้องการอบแห้งโดยตรง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปยังวัสดุ โดยการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน ทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับบรรยากาศแวดล้อมมาก และเกิดการอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว (อัตราการอบแห้งสูง) โดยพลักซ์ความร้อนในกรณีการอบแบบใช้รังสีอินฟราเรดอาจมีค่าสูงกว่ากรณีการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนถึง 4-6 เท่า เครื่องอบแห้งประเภทนี้จึงมีจุดเด่นในแง่ของการประหยัดพลังงานและให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสูญญากาศ

โดยทั่วไปแล้ว แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดอาจเป็นแหล่งกำเนิดเซรามิกซึ่งได้รับความร้อน(อาจโดยการเผาด้วยก๊าซร้อน) จนเกิดการเปล่งรังสีออกมา หรืออาจเป็นแหล่งกำเนิดจากไฟฟ้า และเนื่องจากพลักซ์ ความร้อนที่สูงมากของรังสีอินฟราเรด อาจทำให้วัสดุไหม้หรือสูญเสียคุณภาพที่สำคัญได้ จึงต้องควบคุมพลักซ์ความร้อน ที่แพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด โดยอุณหภูมิของวัสดุ หรือบริเวณใกล้กับวัสดุ เป็นตัวแปรควบคุมหลัก(มีการส่งสัญญาณค่าอุณหภูมิดังกล่าวให้กับชุดควบคุม ซึ่งจะปรับค่าพลังงานไฟฟ้า หรือแรงดันก๊าซร้อน ที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดอีกทอดหนึ่ง)

5) เครื่องอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave dryers)

การอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะที่แตกต่างจากการอบแห้งประเภทอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากการใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนเป็นการทำให้โมเลกุลของสารมีขั้ว (Polar compound) เช่น น้ำในวัสดุเกิดการเคลื่อนที่กลับไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลดังกล่าวทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลและเกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในวัสดุ (Volumetric heating) ดังนั้นจึงเป็นลักษณะของการให้ความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องเกิดการนำเข้าไปจากผิวของวัสดุสู่ภายใน ดังเช่นกรณีการให้ความร้อนในรูปแบบอื่นๆ ด้วยลักษณะที่พิเศษดังกล่าว การอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟจึงได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากจุดเด่นต่างๆ เช่น การเกิดการ

ถ่ายเทความร้อน และมวลสาร (การอบแห้ง) อย่างรวดเร็ว ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟจึงได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคอยู่ในระดับค่อนข้างดี

คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งโดยทั่วไปมีความถี่อยู่ในช่วง 300-3,000 MHz เลยนะแต่ความถี่ที่อนุญาตให้ใช้ได้เชิงอุตสาหกรรมจะอยู่ที่ 2,450 MHz และ 915 หรือ 896 MHz ข้อจำกัด สำคัญของการอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟ คือ ราคาเครื่องอบแห้งที่ค่อนข้างสูงและความต้องการพลังงานที่มีราคาสูง (พลังงานไฟฟ้า) ในการผลิตคลื่นไมโครเวฟ (โดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานไมโครเวฟก็ไม่สูง) ด้วยเหตุผลดังกล่าวเครื่องอบแห้งแบบใช้คลื่นไมโครเวฟจึงเหมาะสำหรับวัสดุซึ่งมีมูลค่าค่อนข้างสูง เช่น สมุนไพร หรือวัสดุทางชีวภาพที่ประกอบด้วยสารออกฤทธิ์ต่างๆ จึงทำให้มีการนิยมใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่น การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ เข้ามาร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ข้อควรระวังอีกประการหนึ่งในการใช้คลื่นไมโครเวฟก็คือ การที่วัสดุมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้น เมื่อวัสดุอุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุจึงอาจเสียหายได้ง่ายเนื่องจากได้รับความร้อนมาก (สักมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา, 2555)

2.12.8 ฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation)

การจำแนกประเภทของฉนวนกันความร้อนตามลักษณะสมบัติของส่วนประกอบหลักที่ใช้เป็นวัสดุ สำหรับทำหน้าที่กันความร้อนโดยแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่

1) ประเภทที่เป็นเส้นใย (Fiber) ประกอบด้วยเส้นใยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ จำนวนมาก วัสดุเส้นใยเหล่านี้อาจเป็นสารอินทรีย์ เช่น เส้นใยของพืชต่างๆ หรือเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ใยแก้ว ใยแร่ เป็นต้น

2) ประเภทเป็นช่องหรือเซลล์ (Cell) โดยแต่ละช่องผลึกแยกออกจากกัน ฉนวนประเภทนี้ประกอบด้วยเซลล์ที่ผนังของแต่ละเส้นจะผนึกติดกัน ผลิตจากวัสดุจำพวกแก้ว พลาสติก หรือยาง ตัวอย่างของฉนวนพวกนี้ได้แก่ โฟมชนิดยืดหยุ่น โฟมโพลีไทรีน โฟมโพลีไอโซ โซยานูเรต โฟมโพลียูรีเทน

3) ประเภทที่เป็นโพรงหรือช่องกลาง (Granule) ซึ่งอากาศสามารถถ่ายเทระหว่างช่องควงได้ฉนวนประเภทนี้ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเป็นโพรง โพรงเหล่านี้ติดต่อกันโดยโพรงอากาศ ดังนั้นความร้อนจึงสามารถถ่ายเทผ่านโพรงอากาศได้

4) ประเภทที่เป็นเกล็ดเล็กๆ (Flake) ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคเหล่านี้ตราดถูกถ่ายเทเข้าไปในโพรงอากาศ หรือทำให้กัตัวเขาเป็นรูปทรงฉนวนที่แข็ง ลักษณะเป็นบล็อกหรือแผ่นอัด ฉนวนแบบเกล็ดที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ เพอร์ไลต์ และเวอร์มิคูไลต์

5) ประเภทที่เป็นแผ่นบาง (Sheet) ทำจากวัสดุที่มีสภาพสะท้อนรังสีความร้อน หรือ มีสภาพการแผ่รังสีต่ำ การใช้งานฉนวนแบบแผ่นบางนี้ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุหลายๆชนิดประกอบกันเป็นระบบมากกว่าใช้วัสดุเพียงชนิดเดียว การใช้งานฉนวนแบบแผ่นที่มีประสิทธิภาพจะต้องใช้ร่วมกับฉนวนแบบที่มีช่องอากาศที่อยู่มีสภาวะอากาศนิ่งเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนและการพาความร้อน (กรัณย์ คำมูล, 2556)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัดของฉนวน

ฉนวน	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
โฟมโพลีสไตรีน	สภาพนำความร้อนต่ำอาจใช้เป็นตัวผลิตและกันซึม สภาพซึมเข้าไปได้ของน้ำและการดูดซึมน้ำต่ำ	ราคาปานกลาง ติดไฟ อุณหภูมิใช้งานต่ำ	อุณหภูมิใช้งานสูงสุดจำกัดเพียง 82 °C
โฟมโพลียูรีเทน/โพลีไอโซไซยานูเรต	สภาพนำความร้อนต่ำสุด ใช้เป็นตัวฉนวนและตัวกันซึมได้ สภาพซึมเข้าไปได้ของน้ำและการดูดซึมน้ำต่ำ	ราคาปานกลางถึงสูง ติดไฟ ต้องการเปลือกหุ้มกันไฟเมื่อติดตั้งในอาคารที่บังคับ	จะเกิดควันที่เป็นพิษขณะลุกไหม้
เพอร์ไลต์	สภาพนำความร้อนต่ำ ไม่ติดไฟ เสถียรภาพ ไม่เป็นพิษ	สภาพซึมเข้าไปได้ของไอน้ำและการดูดซึมน้ำสูงราคาปานกลาง	การเปลือกหุ้มกันไอน้ำ และอุปกรณ์บรรจุทางกายภาพในกรณีแบบลูสฟิลล์

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัดของฉนวน (ต่อ)

ฉนวน	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
ใยแร่	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาต่ำในรูปของเส้นใยอัดแผ่น แบบคลุม และแบบลูสฟิลล์ ถ้าไม่มีวัตถุฉนวนจะไม่ติดไฟ เสถียรภาพ ดูไม่เป็นพิษ	วัตถุสำหรับฉนวนของเส้นใยอัดแผ่นอาจติดไฟและ ตัวประสานอาจลุกไฟไหม้ อากาศที่เคลื่อนที่อาจลดสมรรถนะของความร้อนถ้าไม่ใช่เปลือก หุ้มกัน การแทรกซึมของอากาศราคาปานกลางถึงสูง ในรูปแบบเปลือกและแผ่นแข็ง	ต้องการเปลือกหุ้มกันไอน้ำ เนื่องจากสภาพซึมผ่านของไอน้ำสูง เมื่อใช้กับตัวประสานหรือ วัตถุสำหรับฉนวนจำกัดอุณหภูมิเพียงปานกลาง
ใยแก้ว	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาต่ำในรูปของเส้นใยอัดแผ่น แบบคลุมแบบลูสฟิลล์ และสำหรับฉนวนหุ้มท่อ ถ้าไม่มีวัตถุฉนวนจะไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ การดูดซึม น้ำต่ำ เสถียรภาพดี	วัตถุสำหรับฉนวนของแบบเส้นใยอัด แผ่นอาจติดไฟ และตัวประสานอาจลุกไฟไหม้ อากาศที่เคลื่อนที่อาจลดสมรรถนะทางความร้อน ถ้าไม่ใช่เปลือกหุ้มกันการแทรกซึมของอากาศราคา ปานกลางถึงสูงในรูปแบบแผ่นแข็ง	ต้องการเปลือกหุ้มกันไอน้ำ เนื่องจากสภาพซึมผ่านของไอน้ำสูงเมื่อใช้กับตัวประสาน หรือวัตถุสำหรับฉนวนจำกัดอุณหภูมิเพียงปานกลาง
โฟมแบบยืดหยุ่น	สภาพนำความร้อนต่ำ ราคาต่ำ ติดตั้งและผลิตรายสภาพซึมเข้าไปได้ของไอน้ำต่ำ เสถียรภาพ ไม่เป็นพิษ	ติดไฟได้ ระดับการเกิดควันสูงเมื่อลุกไหม้ ไวต่อแสงอัลตราไวโอเลต	อุณหภูมิใช้งานสูงสุดจำกัดเพียง 105 °C ผลจากการที่เป็นวัสดุ ติดไฟ ทำให้มีข้อบ่งคับในการใช้งานภายในอาคาร

ที่มา: โครงการฉลากสีเขียว ข้อกำหนดฉลากสีเขียวสำหรับฉนวนกันความร้อน, 2540

2.12.9 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้สามแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน (กรัณย์ คำมูล, 2556)

1) การนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิและพลังงานจลน์ โดยที่ความร้อนเคลื่อนที่จากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง ในขณะที่โมเลกุลของสารดังกล่าวไม่ได้เคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม จากการศึกษาการนำความร้อนของฟูริเยร์(Fourier's law of conduction) สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx}$$

เมื่อ q_k คือ ความร้อนถ่ายเทโดยการนำ, W

k คือ ค่าการนำความร้อน, W/Mk

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน, m^2

$\frac{dT}{dx}$ คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความหนา, K/m

2) การพาความร้อน (Heat convection)

การเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาเกิดขึ้นได้ 2 วิธีคือการพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ(Free or natural convection) และการพาความร้อนแบบ กัดไก(Forced convection) อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาสามารถอธิบาย ด้วย กฎการระบายความร้อนของนิวตัน(Newton's law of cooling) ดังสมการ

$$q_c = h_c A (T_s - T_\infty)$$

เมื่อ q_c คือ ความร้อนถ่ายเทโดยการพา, W

h_c คือ สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนโดยการพา, W/m^2K

A คือ พื้นที่, m^2

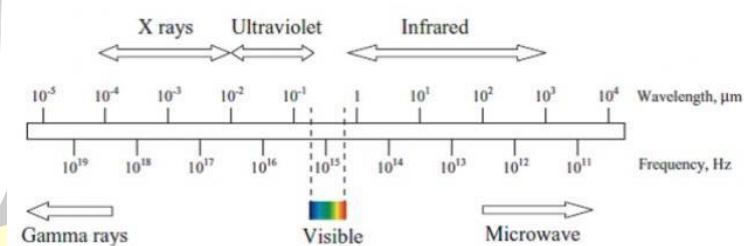
T_s, T_∞ คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ และของไหลตามลำดับ, K

3) การแผ่รังสี (Heat radiation)

การแผ่รังสีความร้อนคือ การถ่ายเทความร้อนจากผิวตัวกลางหนึ่งสู่ผิวตัวกลางหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างซึ่งการแผ่รังสีความร้อนจะอยู่ภายใต้กฎการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ศูนย์องศาสมบูรณ์ สามารถแผ่รังสีความร้อนได้ เมื่อวัตถุหนึ่งได้แผ่รังสีความร้อนมารอบๆตัว และไปกระทบกับวัตถุอื่น บางส่วนของความร้อนก็จะสะท้อนออกมาและบางส่วนก็จะถูกวัตถุนั้นดูดเอาไว้ แต่ถ้าวัตถุสองชิ้นมีอุณหภูมิต่างกันวางใกล้กันแล้ววัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและแผ่รังสีความร้อนออกมามากกว่าดูดเข้า และวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะดูดความร้อนมากกว่า การแผ่รังสีความร้อนออก ในที่นี้จะกล่าวถึงการแผ่รังสีของอินฟราเรด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $0.72 - 1000 \mu\text{m}$ สามารถแบ่งย่อยเป็น 3 ระดับ คือ

- 1.รังสีอินฟราเอเดระยะใกล้ มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $0.72 - 2 \mu\text{m}$ ($1,180 - 3,870 ^\circ\text{C}$)
- 2.รังสีอินฟราเอเดระยะกลาง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $2 - 4 \mu\text{m}$ ($450 - 1,180 ^\circ\text{C}$)
- 3.รังสีอินฟราเอเดระยะไกล มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง $4 - 1000 \mu\text{m}$ ($<450^\circ\text{C}$)

โดยรังสีอินฟราเรดใกล้จะมีความยาวคลื่นสั้น อินฟราเรดกลางมีความยาวคลื่นปานกลาง และอินฟราเรดไกลจะมีช่วงความยาวคลื่นมากที่สุด



ภาพที่ 21 สเปกตรัมการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุ

เห็นได้ว่ารังสีอินฟราเรด (infrared) เป็นสเปกตรัม หนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นไมโครเวฟ และคลื่นแสงที่ตามองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นซึ่งอยู่ในช่วง 0.75 ถึง $1000 \mu\text{m}$

โดยอัตราการถ่ายเทของความร้อนจากการแผ่รังสี จะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ยกกำลังสี่ โดยอาศัยของกฎของ สเตฟาน-โบลท์ (Stefan-Boltzmann Law) ตาม สมการต่อไปนี้

$$q_r = \sigma A T^4$$

เมื่อ q_r คือ ความร้อนถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อน, W

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.669×10^{-8}

W/m²K⁴

A คือ พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสี, m²

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิวของตัวแผ่รังสี, K

4) ความต้านทานความร้อน

ความต้านทานความร้อนในกรณีการนำความร้อนและการพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการ

$$q = \frac{T_{\text{อุณหภูมิผิวผนังขอบแห้งภายในห้องอบ}} - T_{\text{อุณหภูมิอากาศภายนอก}}}{R_{\text{total}}}$$

ค่าความต้านทานการนำความร้อน

$$R_k = \frac{L}{kA}$$

ค่าความต้านทานการพาความร้อน

$$R_c = \frac{1}{h_c A}$$

ค่าความต้านทานความร้อนรวม

$$R_k = R_{k1} + R_{k2} + R_{k3} + R_c$$

$$= \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A} + \frac{1}{h_c A}$$

เนื่องจากการวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมอาจมีความไม่แม่นยำ ทำให้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความไม่ถูกต้อง ดังนั้นการคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียผ่านผนังอบแห้ง จะคิดเฉพาะเทอมของการนำความร้อน สมการการถ่ายเทความร้อนจึงลดรูปดังสมการ

$$q = \frac{T_{\text{อุณหภูมิผิวผนังอบแห้งภายในห้องอบ}} - T_{\text{อุณหภูมิผิวผนังชั้นสุดท้าย}}}{R_{\text{total}}}$$

L_n คือ ความหนาของวัสดุ ชนิดที่ n ตามลำดับ, m

k_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดที่ n ตามลำดับ, $W/m \cdot K$

h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ, m^2

2.12.10 ช่วงอัตราการอบแห้ง

การอบแห้งนั้นเป็นการกำจัดความชื้นโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อน ความร้อนที่ได้รับจะเป็นความร้อนแฝง ที่ใช้ในการระเหยความชื้น โดยทั่วไปการอบแห้ง จะใช้อากาศร้อน ในการลดความชื้น ให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งการอบแห้งจะกำจัดความชื้น ให้มีการทำลายลักษณะคุณภาพ ให้น้อยที่สุด โดยความชื้นที่ลดลงจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ไม่เน่าเสีย การอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง

1) ช่วงอัตราการอบแห้งเริ่มต้น การอบแห้งช่วงเริ่มต้นจะเป็นช่วงที่อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ เข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน และมีการระเหย ความชื้นเกิดขึ้นที่ผิวของวัตถุ โดยอัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง ดังสมการ

$$q = h' A (T_{\infty} - T_s)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อน (W)

h' คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/(m^2 \cdot K)$)

A คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการพาความร้อน (m^2)

T_{∞} คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ (K)

T_s คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลผ่านผิววัสดุ (K)

2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การอบแห้งช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำสูงบริเวณผิวของวัสดุ โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิววัสดุกับอากาศที่อบแห้ง เป็นการพาความร้อนและการ

ถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้น พร้อมกับการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิผิววัสดุ มีค่าโดยประมาณเท่ากับ อุณหภูมิกระเปาะเปียก สามารถเขียนสมการ ได้ดังสมการ

$$m_w = \frac{h'A(T_\infty - T_{wb})}{h_{fg}}$$

เมื่อ m_w คือ อัตราการ ระเหยน้ำ (kg/s)

h' คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/(m^2 \cdot K)$)

A คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการพาความร้อน (m^2)

T_∞ คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ (K)

T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกในห้องอบแห้ง (K)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ผิววัสดุ (K)

3) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง น้ำหนักที่ผิววัสดุจะค่อยๆลดลง เนื่องจากอัตราการเคลื่อนตัวของน้ำภายในวัสดุ ไปที่ผิวมีค่าต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุ อัตราการระเหยน้ำในช่วงนี้ควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ และปริมาณความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ ระยะทางในการแพร่หรือการเคลื่อนที่ของความร้อนและมวลจะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดความเข้มข้นภายในที่เป็นความชื้นอิสระจะหมด ความชื้นของวัสดุ ที่หาได้ณจุดนี้เรียกว่าความชื้นสมดุล ซึ่งหาได้จากสมการ

$$m_w = - \frac{AD \partial C}{\partial x}$$

เมื่อ m_w คือ อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)

A คือ พื้นที่ผิวที่เกิดการพาความร้อน (m^2)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)

C คือ ความเข้มข้นของความชื้น (kg/m^3)

X คือ ระยะ (m)

พหุบัน ปณฺ ติโต ชเว

2.12.11 วอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity; a_w)

แอกทิวิตีของน้ำมีความสำคัญมากในการเก็บรักษา เพราะพบปัญหาการเจริญเติบโตได้ดีของจุลินทรีย์จากปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ เนื่องจากการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์จะสัมพันธ์กับค่าแอกทิวิตีของน้ำ ซึ่งก็คืออัตราส่วนความดันไอของน้ำที่อยู่อย่างอิสระในวัสดุต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ และความดันเดียวกัน ถ้าเปรียบเทียบในกรณีของระบบไอน้ำกับอากาศแห้ง ค่าอัตรานี้ก็คือความชื้นสัมพัทธ์ ค่าแอกทิวิตีของน้ำที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาไม่ควรสูงกว่า 0.6 โดยค่าแอกทิวิตีของน้ำหาได้จากสมการ

$$a_w = \frac{p}{p_w}$$

เมื่อ a_w คือ แอกทิวิตีของน้ำ(เศษส่วน)

p คือ ความดันไอของน้ำในอาหาร(kPa)

p_w คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์(kPa)

ตารางที่ 4 ระดับค่าวอเตอร์แอกทิวิตีและความสำคัญ (กอบพัชรกุล,2550)

Aw	ความสำคัญ
1.00	
0.95	Pseudomonas, Bacillus, Clostridium perfringens และยีสต์บางชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้
0.90	ขีดต่ำสุดสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั่วไป Salmonella, Vibrio parahaemolyticus, Lactobacillus และยีสต์บางชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้
0.85	ยีสต์หลายชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้
0.80	ขีดต่ำสุดสำหรับปฏิกิริยาของเอนไซม์และการเจริญเติบโตของเชื้อราส่วนใหญ่ Staphylococcus aureus ไม่สามารถเจริญได้
0.75	ขีดต่ำสุดสำหรับ Halophilic bacteria
0.70	ขีดต่ำสุดสำหรับการเจริญเติบโตของ Xerophilic fungi ส่วนใหญ่
0.65	อัตราเร็วสูงสุดสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล(Maillard reaction)
0.60	ขีดต่ำสุดสำหรับการเจริญเติบโตของ Osmophilic bacteria และ Xerophilic yeast และ Fungi
0.55	ขีดต่ำสุดสำหรับการดำรงชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 4 ระดับค่าวอเตอร์แอกทิวิตีและความสำคัญ (ต่อ)

Aw	ความสำคัญ
0.40	อัตราเร็วต่ำสุดของปฏิกิริยาออกซิเดชัน
0.25	ความต้านทานสูงสุดของแบคทีเรียสร้างสปอร์

2.12.12 วิธีการหาความชื้น

แบ่งได้ 2 วิธี คือ วิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม

1) วิธีการหาความชื้นโดยตรงมีหลายวิธี เช่น การใช้ตู้อบ การกลั่น การใช้สารดูดความชื้นในห้องสูญญากาศ เป็นต้น วิธีตรงเป็นวิธีที่ใช้เวลา แต่ก็มีผลถูกต้องสูง สามารถอ้างอิงได้

การหาความชื้นของเมล็ดพืชอาจทำได้โดยใช้ตู้อบ ในกรณีแรกเมล็ดพืชจะถูกบดให้ละเอียดและใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ในกรณีที่สองนำเมล็ดพืช ไม่ได้บดใส่ไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมง ตัวเลขที่กล่าวนี้เป็นเพียงข้อเสนอแนะเท่านั้น ความแตกต่างอาจเกิดขึ้นได้สำหรับมาตรฐานของแต่ละประเทศ รายละเอียดวิธีการหาความชื้นอาจหาอ่านได้จากมาตรฐานของ Association of official Agricultural Chemists

ในกรณีที่เมล็ดพืชมีความชื้นสูงต้องแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ใส่ตัวอย่างเมล็ดพืชในตู้อบแห้ง เพื่อให้ความชื้นลดลงช่วงหนึ่งก่อน จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่มีความชื้นลดลงบ้าง แล้วมาบดให้ละเอียดและบดให้แห้งต่อไป ความชื้นในเมล็ดพืชสามารถคำนวณได้จากมวลของน้ำที่หายไป

การหาความชื้นอาจทำได้โดยบดตัวอย่างเมล็ดพืชให้ละเอียดและใส่ไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ความดันสัมบูรณ์ 25 mmปรอท เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำออกจากตู้อบไปเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท (อาจมีตัวดูดความชื้นด้วย) เมื่อตัวอย่างเมล็ดพืชเย็นลงแล้วก็ทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่า ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณความชื้นต่อไป

2) วิธีการหาความชื้นโดยอ้อม อาจทำได้โดยการวัดคุณสมบัติบางอย่างซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้า หรือคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric) วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถทำได้รวดเร็ว ข้อเสียคือ ความชื้นที่หาได้อาจไม่ถูกต้องนัก แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันในวงการค้าทั่วไป เนื่องจากทำได้รวดเร็วไม่ต้องรอเป็นเวลามากหลายชั่วโมงเหมือนดังเช่นกรณีการใช้ตู้อบ (กรัณย์ คำมูล, 2556)

2.12.13 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ชื้นหรือแห้งแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1) ความชื้นมาตรฐานเปียก เป็นความชื้นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยเขียนในรูปของ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$M_w = \frac{w - d}{w} \times 100$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

W คือ มวลของวัสดุสด (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น)

2) ความชื้นมาตรฐานแห้ง เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากจะช่วยให้คำนวณได้สะดวกขึ้น ซึ่งเป็นมวลของวัสดุแห้งที่คงที่ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$M_d = \frac{w - d}{w} \times 100$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

w คือ มวลของวัสดุสด (kg)

d คือ มวลของวัสดุอบแห้ง (kg)

2.13 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง เป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างการอบแห้งต่าง ๆ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการทำนายผลการทดลองได้ดี แต่มีข้อจำกัดที่การนำไปใช้งานอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่ใช้สร้างสมการเท่านั้น โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้สมการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ชยานิส รัตนมงคล, 2561) ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอบแห้ง

Model	Model name	Model expression
1	Newton	EXP (-kt)
2	Page	EXP (-k(t ⁿ))
3	Modified page	EXP (-kt) ⁿ)
4	Henderson & pabis	a * EXP (-kt)
5	Logarithmic	a * EXP (-kt)+c
6	Two term	a * EXP (-k ₁ t)+(bEXP (-k ₂ t))
7	verma et al	a * EXP (-kt)+ ((1-a) * EXP(-gt))
8	modified Henderson&pabis	a * EXP(-kt)+ (b * EXP(-gt))+(c * EXP(-ht))

หมายเหตุ เมื่อ a b c g h k₁ k₂ n คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ , t คือ ระยะเวลาการอบ แห่ ช่วงเวลาใดๆ (นาทื) , k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอบแห้ง (ชั่วโมง⁻¹)

จากตารางที่ 5 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุเพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการอธิบายกราฟอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งจะพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแคว (χ^2) โดยที่แบบจำลองที่ดี จะต้องต้องให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) ที่สูงกว่า และให้ค่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแคว (χ^2) ที่ต่ำกว่า ในแต่ละแบบจำลอง(ณัฐพล กระจำง, 2560) ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{pre,i})^2}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนาย

$\overline{MR}_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนาย

N คือ จำนวนชุดข้อมูลจากการทดลอง

n คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff})

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) คือ คุณสมบัติจำเพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ของฟิค (Fick's second law of diffusion) ที่สมมุติว่า การแพร่ของมวลน้ำหรือความชื้นของวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น (ชฎานิส รัตนมงคล, 2561) โดยกำหนดให้วัสดุอบแห้งนั้นมีพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 (D_{eff}) t}{L^2} \right]$$

เนื่องจากการอบแห้งมีการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน จึงสามารถปรับแก้สมการได้ และสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังสมการ

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{\pi^2 (D_{eff}) t}{L^2} \right]$$

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) และคำนวณหาค่าประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุนในสภาวะที่เหมาะสม ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$D_{eff} = -\frac{\text{slope} \cdot L^2}{\pi^2}$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)

L คือ ความหนาของตัวอย่าง (เมตร)

2.15 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

2.15.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate; DR)

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate; DR) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้งหรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง โดยค่าอัตราการอบแห้ง (ชยูนิต รัตนมงคล, 2561) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$DR = \frac{w_i - w_f}{t}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง ($\text{kg}_{\text{water}}/\text{h}$ หรือ $\% \text{db/h}$)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.15.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ค่าที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SEMR สามารถคำนวณจากสมการ (พิบูลย์ สีคำ, 2564)

$$SEC = \frac{3.6P_E}{w_i - w_f}$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$)

P_E คือ พลังงานที่ใช้ในการอบ (kWh)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาการใช้ผงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากเต้าหู้ในอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต องค์ประกอบซาก และคุณภาพเนื้อ ทำการศึกษาโดยแบ่งไก่เนื้อพันธุ์ Ross 308 แรกเกิดเพศผู้ จำนวน 180 ตัว เป็น 5 กลุ่ม ตามสูตรอาหาร ซึ่งในแต่ละกลุ่มจะมี 3 ซ้ำ ซ้ำละ 12 ตัว นั่นคือ กลุ่มที่ 1 ใช้อาหารควบคุม (ไม่ใช้ผงหนอนแมลงวันในสูตรอาหาร) ในส่วนของกลุ่มที่ 2, 3, 4 และ 5 ใช้อาหารผสมผงหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 1, 2, 3 และ 4% ในสูตรอาหาร เมื่อ

พิจารณาสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต พบว่า สมรรถภาพการเจริญเติบโตและองค์ประกอบซากไม่มีความแตกต่างกัน การใช้ผงหนอนแมลงวันลาย 2 และ 3% ทำให้ค่าการสูญเสีย น้ำจากการต้มสุกของเนื้อต่ำกว่ากลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ใช้หนอนแมลงวันลาย 4% ในสูตรอาหาร และการใช้ในระดับ 1, 2 และ 3% ทำให้การเกิดออกซิเดชันในเนื้อออกหลังต่ำกว่ากลุ่มควบคุม เมื่อทดสอบ ความแตกต่างของการใช้ผงหนอนแมลงวันลายในระดับ 1, 2, 3 และ 4% พบว่า ควรใช้ผงหนอนแมลงวันลายที่ระดับ 1, 2 และ 3% เพื่อปรับปรุงคุณภาพเนื้อให้ดีขึ้น แต่ถ้าใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกสามารถใช้ผงหนอนแมลงวันได้ถึง 4% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและองค์ประกอบซาก (จักรพัทร มาลามณีรัตน์ และคณะ, 2563)

จากการศึกษา เรื่อง การลดต้นทุนค่าอาหารสำหรับจิ้งหรีดบ้าน ทำการศึกษาโดยการเปรียบเทียบการทดลองสูตรอาหารจากการผสมสูตรจากวัตถุดิบทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว เมล็ดข้าวโพด รำอ่อน มันเส้น และไบมันสำปะหลัง กับอาหารไก่สำเร็จรูปโปรตีน 21% ในการทดลองได้เลี้ยงจิ้งหรีดต่อเนื่องกันทั้งหมด 2 รุ่น พบว่า รุ่นที่ 1 อาหารไก่สำเร็จรูปโปรตีน 21% ให้น้ำหนักรวมเฉลี่ยของจิ้งหรีดมากที่สุด คือ 1,946.93 กรัม/บ่อ ใช้เวลาเลี้ยง 41-42 วัน และมีต้นทุนค่าอาหาร 35.94 บาท/กิโลกรัม ในขณะที่อาหารสูตรที่ผสมด้วยไบมันสำปะหลัง 25% ได้น้ำหนักจิ้งหรีดรวมเฉลี่ยรองลงมา คือ 1,224.4 กรัม/บ่อ ใช้เวลาเลี้ยง 44-47 วัน และมีต้นทุนค่าอาหารเฉลี่ย 22.74 บาท/กิโลกรัม ส่วนรุ่นที่ 2 เลี้ยงด้วยอาหารทั้ง 4 สูตร พบว่า น้ำหนักจิ้งหรีดรวมเฉลี่ยที่ได้อยู่ที่ 1,691- 1,845 กรัม/บ่อ ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อพิจารณาต้นทุนค่าอาหารในการเลี้ยงจิ้งหรีด พบว่าอาหารไก่สำเร็จรูปโปรตีน 21% ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ 44 วัน แต่มีต้นทุนค่าอาหารสูงที่สุด คือ 33.81 บาท/กิโลกรัม ในขณะที่อาหารผสมทั้ง 3 สูตร ใช้เวลาเลี้ยง 45-47 วัน และมีต้นทุนค่าอาหารเฉลี่ย 25-30 บาท/กิโลกรัม (สุกฤตา อนุตระกูลชัย และสมสมร แก้วบริสุทธ, 2557)

จากการศึกษา เรื่อง จิ้งหรีดทองคำ พบว่าเป็นแมลงกินได้ที่มีการนำมาเพาะเลี้ยงและบริโภคอย่างแพร่หลาย ทำการศึกษาโดยการเลี้ยงจิ้งหรีดตั้งแต่อายุ 7 ถึง 45 วัน โดยใช้อาหาร 2 สูตร เปรียบเทียบกันคือ หญ้าขนและหญ้าขนเสริมอาหารไก่ พบว่า จิ้งหรีดกินอาหารทั้งสิ้น 198.17 และ 320.77 กรัม ตามลำดับ การเลี้ยงด้วยอาหารทั้งสองสูตรจิ้งหรีดสามารถเติบโตจนครบวงจรชีวิตได้ แต่การเลี้ยงด้วยหญ้าขนเสริมอาหารไก่ให้น้ำหนักตัวในระยะตัวเต็มวัยอายุ 45 วันสูงกว่าและมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีกว่า ในส่วนการอดอาหารแก่จิ้งหรีดจะส่งผลกระทบต่อให้น้ำหนักตัวลดลงทันที แต่หากต้องการกำจัดเศษอาหารออกจากระบบทางเดินอาหารให้เหลือปริมาณน้อยและมีน้ำหนักตัวลดลงน้อยที่สุดระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 24 ชม. หลังการอดอาหาร การยอมรับของผู้บริโภคทางด้านประสาทสัมผัสพบมีการยอมรับจิ้งหรีด ทั้งดีให้อาหารทุกช่วงเวลา ทั้งในเรื่องของสี กลิ่น รสชาติและลักษณะเนื้อสัมผัสโดยมีความชอบรวมอยู่ระหว่าง 6.87-7.53 คะแนน แต่มีแนวโน้มชอบจิ้งหรีดที่อดอาหารเป็นเวลา 0 และ 24 ชม. มากที่สุด (อินทัย วิงสระน้อย, สุกัญญา สายธิ, และ พรประภา ชุนถนอม, 2556)

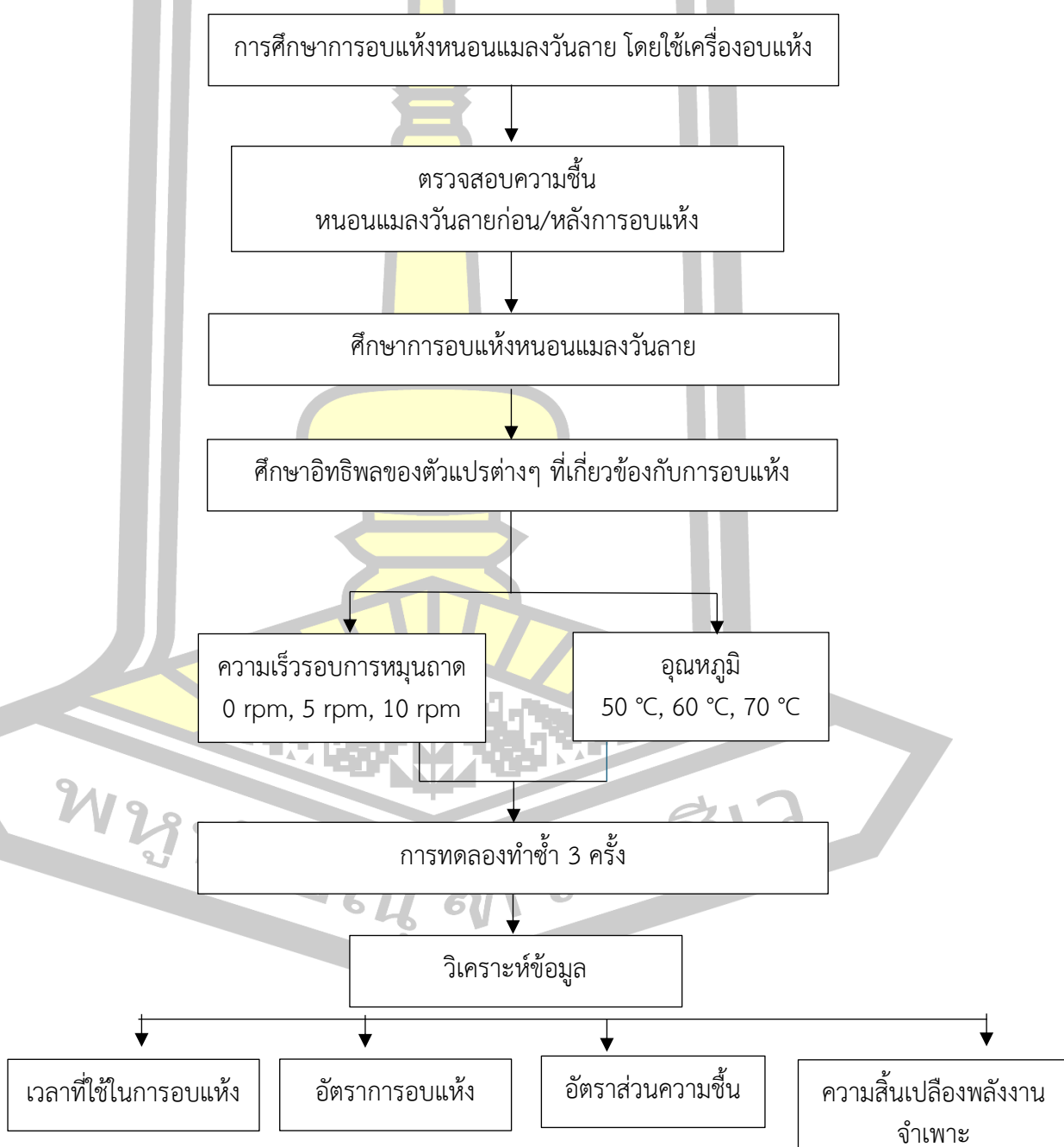
จากการศึกษา เรื่อง การใช้หนอนแมลงวันลายเป็นส่วนผสมในอาหารลูกปลาหมอไทยชุมพร 1 ต่อการเจริญเติบโตอัตราการรอดตายและราคาอาหารที่ทำให้ปลามีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัมของ ปลาหมอไทยชุมพร1 ทำการศึกษาโดยการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ แบ่งการทดลองเป็น 4 กลุ่มทดลองๆละ 4 ซ้ำ คือกลุ่มทดลองที่ 1 อาหารเม็ดสำเร็จรูป กลุ่มทดลองที่ 2-4 คือ อาหารผสม หนอนแมลงวันลายป่นที่ระดับ 0%, 30% และ 50% ตามลำดับ (อาหารในกลุ่มทดลองที่ 1-4 มี โปรตีนเท่ากับ33.59 31.47 31.91 และ 32.03% ตามลำดับ) และให้อาหาร 2 มื้อต่อวัน เป็น ระยะเวลา3 สัปดาห์ จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ ANOVA และเปรียบเทียบชุด การทดลองด้วย LSD พบว่า กลุ่มทดลองที่ 1 ปลามีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากับ 4.85 ± 0.01 กรัม สูง กว่ากลุ่มทดลองที่ 2-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่อัตราการแลกเนื้อและอัตราการรอดตาย ของแต่ละชุดทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในส่วนของต้นทุนอาหารของกลุ่มทดลองที่ 1-4 เท่ากับ 25.00, 18.60, 17.57 และ 16.81 บาทต่อกิโลกรัมตามลำดับ เมื่อพิจารณาราคาอาหารที่ทำให้ปลามี น้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม พบว่ามีค่าเท่ากับ 29.34 ± 3.26 27.61 ± 6.47 23.68 ± 2.52 และ 24.26 ± 1.25 บาทตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้หนอนแมลงวันลาย 30% เสริมในอาหารสำหรับเลี้ยงปลาหมอไทยชุมพร 1 เพื่อลดต้นทุนการผลิต (Munkit, 2020)

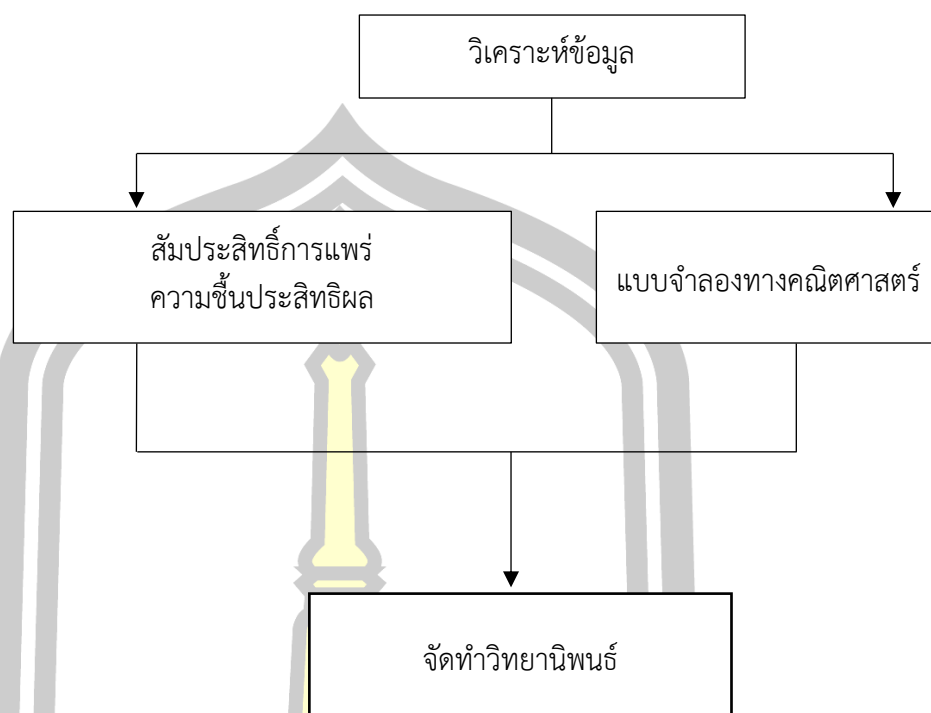


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยจะทำ การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหนอนแมลงวันลาย เติรียมหนอนแมลงวันลายเพื่อนำไปใช้ในการเป็นวัตถุบิอาหารลดต้นทุน การทดสอบการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งตู้อบลมร้อน โดยมีขั้นตอนการ





3.1 การเตรียมหนอนแมลงวันลายในกระบวนการอบแห้ง

3.1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ผู้วิจัยมีการเลือกใช้นอนแมลงวันลายช่วงอายุ 18-25 วัน สำหรับการศึกษา โดยก่อนการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ผู้วิจัยมีการลวกหนอนแมลงวันลายก่อนการอบแห้ง ซึ่งการลวก เป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดทั้งในระดับทั่วไปหรือระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีด้านสุขอนามัยและลดการเกิดออกซิเดชันของไขมัน นอกจากนี้ยังช่วยให้แมลงตายได้ในทันที และยังลดปริมาณจุลินทรีย์ ซึ่งช่วยลดอันตรายจากจุลชีววิทยาในผลิตภัณฑ์ โดยทำการลวกหนอนแมลงวันลายที่อุณหภูมิขั้นต่ำ 80 °C เป็นเวลาประมาณ 5 นาที



(ก) การล้างทำความสะอาด



(ข) การลวกที่อุณหภูมิมากกว่า
80 องศาเซลเซียส



(ค) การฟ้งให้แห้งก่อนจัดเก็บที่ความเย็น
ภาพที่ 22 การลวกหนอนแมลงวันลายก่อนการอบแห้ง

3.2 การตรวจสอบความขึ้นหนอนแมลงวันลายก่อน-หลังการอบแห้งของหนอนแมลงวันลาย

หนอนแมลงวันลายมีความสำคัญ และมีผลต่อกระบวนการอบแห้ง ทำให้ผู้วิจัยมีความจำเป็นต้องทราบข้อมูลความขึ้นก่อนและหลังการอบแห้ง เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยศึกษาคุณสมบัติดังนี้

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

- 1) หนอนแมลงวันลาย แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 หนอนแมลงวันลาย

พูน ปณ ทิโต ชีเว

2) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) สำหรับหาค่าความชื้น แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3) ถ้วยอลูมิเนียมสำหรับใส่วัสดุหาค่าความชื้น แสดงดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ถ้วยอลูมิเนียม

4) เครื่องชั่งดิจิตอลละเอียด ± 0.001 (ยี่ห้อ Brifit) พิกัดการใช้งานเครื่องมือ แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 เครื่องชั่งดิจิตอลละเอียด ± 0.001 (ยี่ห้อ Brifit)

3.2.2 ความชื้นในวัสดุ (Moisture Content)

การหาความชื้นในวัสดุ อ้างอิงตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน AOAC 968.11 (AOAC, 2000) ความชื้นหนอนแมลงวันลายสามารถทำได้โดยใช้วิธีการหาความชื้นทางตรงด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรืออบจนน้ำหนักคงที่ตัวอย่างคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างหนอนแมลงวันลายด้วยตาชั่งละเอียด ± 0.001 แสดงดังภาพที่ 26 จากนั้นคำนวณหาความชื้นของหนอนแมลงวันลายด้วยสมการ

$$M_d(\%) = \frac{(w-d)}{d} \times 100 \quad \text{ความชื้นฐานแห้ง}(\%d.b.)$$

$$M_w(\%) = \frac{(w-d)}{w} \times 100 \quad \text{ความชื้นฐานเปียก}(\%w.b.)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นฐานแห้ง (%d.b.),

M_w คือ ความชื้นฐานเปียก (%w.b.),

w คือ มวลเปียกของวัสดุ (กิโลกรัม),

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)

3.3 การทดสอบการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน

การศึกษาการอบแห้งหนอนแมลงวันลายโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน จะทำการศึกษาสภาวะอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมในการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบ โดยสภาวะที่จะศึกษา คือ อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที และความเร็วลมเฉลี่ยที่ 3 เมตรต่อวินาที เพื่อการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง จากอัตราการอบแห้ง ประเมินการใช้พลังงานด้วยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) และระยะเวลาในการอบแห้ง

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) หนอนแมลงวันลายที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิขั้นต่ำ 80 °C แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 หนอนแมลงวันลายที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิขั้นต่ำ 80 °C

- 2) เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน

3) ตู้อบหาความชื้น แสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ตู้อบหาความชื้น

4) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ 12 ช่อง รุ่น BTM-4208SD แสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 เครื่องวัดอุณหภูมิ 12 ช่อง รุ่น BTM-4208SD

ที่มา: (legatool.com/th/btm-4208sd-temperature-meter-12-channels)

4) เครื่องชั่งน้ำหนัก OHAUS รุ่น PA4102 แสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 เครื่องชั่งน้ำหนัก OHAUS รุ่น PA4102

ที่มา: (weightscalethailand.com/index.php?lay=show&ac=cat_show_pro_detail&pid=85117,2566)

5) แอมมิเตอร์ไฟฟ้า (6IN1 Din Rail AC Monitor) แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แอมมิเตอร์ไฟฟ้า (6IN1 Din Rail AC Monitor)

ที่มา: (lazada.co.th/products/6in1-din-rail-ac-monitor-110v-220v-380v-100a-power-factor-active-kwh-volt-amp, 2566)

6) Anemometer UT363S Digital แสดงดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 Anemometer UT363S Digital

ที่มา: (meters.uni-trend.com/product/ut363s/#Specifications, 2566)

3.3.2 รายละเอียดเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนภาคหมุน

อุปกรณ์และส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง

1) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ชนิดท่อและครีบ (Finned-tube) โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้กำลังไฟ Power input รวม 3000 W ทำงานด้วยระบบไฟฟ้าความถี่ 50 Hz แรงดันไฟฟ้า 240 V กระแสไฟ 14 แอมป์ แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electric heater) ชนิดท่อและครีป (Finned-tube)

2) ระบบหมุนเวียนอากาศ

ระบบหมุนเวียนอากาศร้อนในห้องอบแห้ง มีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศร้อน จะสามารถพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ได้ดี และต่อเนื่อง ตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งความชื้นจำเป็นต้องออกจากห้องอบให้มากที่สุด เพื่อกระตุ้นการระเหย ความชื้นที่ผิววัสดุอบแห้ง ดังนั้นระบบหมุนเวียนอากาศต้องสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหล หรือความเร็วลม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศขนาด 75 mm วัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) 2 ชุด แสดงดังภาพที่ 35 และภายในห้องอบมีการออกแบบช่องลมที่มีขนาดกว้าง 4 cm และยาว 56 cm ทั้งสองด้านของห้องอบ จำนวนทั้งสิ้น 12 ช่อง แสดงดังภาพที่ 36



ภาพที่ 35 ระบบหมุนเวียนอากาศท่อลมขนาด 75 mm วัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) 2 ชุด



ภาพที่ 36 ช่องลมทั้งสองด้านของห้องอบ จำนวนทั้งสิ้น 12 ช่อง

3) ห้องอบแห้งและถาดอบแห้ง

ห้องอบแห้งถูกออกแบบให้สามารถจัดเรียงวัตถุได้ เป็นแบบจัดเรียงไว้ในถาด และทำการออกแบบห้องอบ และสามารถให้อากาศร้อน สามารถเคลื่อนที่แบบไหลเวียนผ่านผิววัสดุ (Concurrent Flow) และสามารถควบคุมความเร็วลม โดยอยู่ในช่วง 3 - 6 m/s ซึ่งมีต้นกำเนิดความเร็วลม คือ โบว์เวอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm แรงดันไฟฟ้า 220 V แรงมอเตอร์ 250 วัตต์ ความถี่ 50 Hz กระแสลม 504 m³/h รอบการหมุน 2800 รอบ/นาที แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 โบว์เวอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm

และในส่วนห้องอบถูกออกแบบให้มีขนาดกว้าง 99 cm ความยาว 70 cm และสูง 122 cm ความหนาของผนังอยู่ที่ 5 cm ประตูห้องอบมีขนาดกว้าง 76 cm สูง 128 cm และความหนาของประตูอยู่ที่ 5 cm โดยชิ้นส่วนทั้งหมดสร้างจากวัสดุสแตนเลส 304 (SUS 304) และมีการติดตั้ง

ฉนวนกันความร้อน เพื่อป้องกันและลดการสูญเสียพลังงานความร้อน และภายในห้องอบทำการติดตั้ง ถาดอบแห้งแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร จำนวน 6 ถาด โดยถาดอบจะมีการ แยกออกจากเพลahmen ซึ่งเพลahmenนั้น มีการขับเคลื่อนด้วยระบบทดเฟือง ติดตั้งอยู่ส่วนบนห้อง อบแห้ง ซึ่งระบบทดเฟือง มีหน้าที่หมุนถาดอบแห้ง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในถาดอบ ได้รับลม ร้อนอย่างทั่วถึงด้วยความเร็วรอบที่กำหนด แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ส่วนห้องอบและถาดอบแห้งแบบวงกลม

3.3.3 วิธีการทดลอง

1) นำหนอแมลงวันลายที่เตรียมไว้หาค่าความชื้นก่อนอบ เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้มีการอบหลายปัจจัย และหลายตัวอย่าง จึงทำให้ต้องมีการหาความชื้นก่อนทำการอบเพื่อดูมวลแห้งแต่ ละการทดลอง โดยหาความชื้นจากการหาค่าความชื้นในวัสดุ อ้างอิงตามมาตรฐาน AOAC 968.11 (AOAC, 2000) ความชื้นหนอแมลงวันลายสามารถทำได้โดยใช้วิธีการหาความชื้นทางตรงด้วยการ อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือ อบจนน้ำหนักคงที่ตัวอย่างคงที่

2) ทำการทดลองด้วยสภาวะที่กำหนดไว้ พร้อมทั้งเก็บข้อมูลตามข้อมูลดังตารางที่ 6

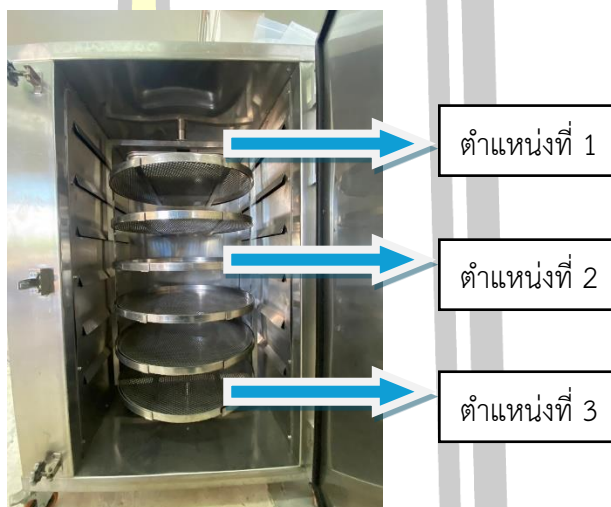
ตารางที่ 6 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
1.ความขึ้นนอนแมลงวัน	-สุ่มเก็บตัวอย่างทุกครั้งที่เราเริ่มทำการ อบแห้ง ในแต่ละการทดลอง เพื่อหา ความขึ้นด้วยเครื่องหาความขึ้น	-ความขึ้นเริ่มต้น -น้ำหนักน้ำเริ่มต้น -น้ำหนักมวลแห้งเริ่มต้น
2.ความขึ้นนอนแมลงจาก การอบ	-ทำการเก็บน้ำหนักนอนแมลงวัน ลาย เพื่อหาน้ำหนักที่หายไปจากการ อบแห้งแต่ละปัจจัย โดยเก็บตัวอย่าง ทุกๆ 30 นาที จนความขึ้นเหลือน้อย กว่า 10% d.b.	-ระยะเวลาในการอบแห้ง นอนแมลงวันลาย -อัตราการอบแห้งนอน แมลงวันลาย -น้ำหนักที่หายไประหว่างลด ความขึ้น
3.ความขึ้นนอนแมลงวัน หลังการอบ	-สุ่มเก็บตัวอย่างทุกครั้งหลังทำการ อบแห้ง ในแต่ละการทดลอง เพื่อหา ความขึ้นด้วยเครื่องหาความขึ้น	-ความขึ้นสุดท้าย -น้ำหนักมวลแห้ง
4.น้ำหนักของแก๊สที่ใช้ใน การอบแห้ง	-ชั่งน้ำหนักแก๊สก่อนทำการทดลอง พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักชีวมวลที่ใช้ไป ทุกๆ 30 นาที	-ความสิ้นเปลืองพลังงาน ความร้อน
4.พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการ อบแห้ง	จดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไประหว่างทำ การทดลอง โดยบันทึกค่าพลังงานทาง ไฟฟ้า โดยดูจากเครื่องวัด(แอมมิเตอร์) โดยอ่านค่าทุก 10 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	-ความสิ้นเปลืองพลังงาน ไฟฟ้า

3) ข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ
ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ความขึ้นในวัสดุ อัตราการอบแห้ง อัตราส่วนความขึ้น (MR) ค่า
สัมประสิทธิ์การแพร่ความขึ้นประสิทธิผล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ต่อไป

3.4 การทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

ทำการทดสอบการกระจายลมร้อนภายในห้องอบแห้ง โดยเริ่มต้นการเปิดเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมเริ่มต้น 0 และ 2.5 m/s หลังจากนั้นรอกเครื่องให้ทำงานในจนครบเวลา 1 ชั่วโมงของแต่ละความเร็วลม โดยทำการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งถาดอบแห้งด้านบนสุด (ตำแหน่งที่ 1) ตำแหน่งถาดอบแห้งตรงกลาง (ตำแหน่งที่ 2) และ ตำแหน่งถาดอบแห้งด้านล่างสุด (ตำแหน่งที่ 3) แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบ

3.5 การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการ คือ >10% d.b ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย มีหน่วยเป็น MJ/kg-water โดยการหาปริมาณน้ำที่ระเหยไปจนเหลือความชื้น >10% d.b จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

$$SEC = \frac{3.6P_E}{W_i - W_f}$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg_{water})

P_E คือ พลังงานที่ใช้ไปในการอบ (kWh)

W_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg)

W_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)

3.6 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน

3.6.1 อัตราส่วนความชื้น (MR)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) คือค่าการบ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาอบแห้งดำเนินต่อไปในเวลาใดๆ (ศราวุธ รัตนวงษ์ และคณะ, 2565) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})}$$

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมุติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} \ll M_0$) และความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} \ll M_t$) จึงสามารถเขียนสมการใหม่(ศราวุธ รัตนวงษ์ และคณะ, 2565) ดังนี้

$$MR = \frac{(M_t)}{(M_0)}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (% d.b.)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% d.b.)

3.6.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff})

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) คือ คุณสมบัติจำเพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของกระแสอากาศ พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ที่สมมุติว่า การแพร่ออกของมวลน้ำหรือความชื้นของวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น (ชญาณิช รัตนมงคล, 2561)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 (D_{eff}) t}{L^2} \right]$$

เนื่องจากการอบแห้งมีการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน จึงสามารถปรับแก้สมการได้ และสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังสมการที่

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[-\frac{\pi^2 (D_{eff}) t}{L^2} \right]$$

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุนในสภาวะที่เหมาะสม ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$D_{eff} = -\frac{\text{slope} \cdot L^2}{\pi^2}$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล(m^2/s)

L คือ ความหนาของตัวอย่าง (เมตร)

3.6.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

สมการเอมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุที่ใช้ออบแห้ง เพื่อใช้สำหรับทำนายอัตราการอบแห้ง โดยรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม สำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง หนองแมลงวันลาย ด้วยเครื่องอบแห้งแบบอินฟาเรด และเครื่องอบแห้งแบบถาด ในงานวิจัยนี้เลือกสมการที่ใช้ทางงานด้านการอบแห้ง 8 สมการ (ชฎานิส รัตนมงคล, 2561) แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) โดยใช้โปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Science) โดยรูปแบบสมการมีดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล 8 แบบจำลอง

Model	Model name	Model expression
1	Newton	EXP (-k * t)
2	Page	EXP (-k * (t ⁿ))
3	Modified page	EXP (-k * t) ⁿ)
4	Henderson & pabis	a * EXP (-k * t)
5	Logarithmic	a * EXP (-k * t)+c
6	Two term	a * EXP (-k ₁ * t)+(b * EXP (-k ₂ * t))

ตารางที่ 7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการออบแท้งแบบเอมพิริคัล 8 แบบจำลอง (ต่อ)

Model	Model name	Model expression
7	verma et al	$a * \text{EXP}(-k * t) + ((1-a) * \text{EXP}(-g * t))$
8	modified Henderson&pabis	$a * \text{EXP}(-k * t) + (b * \text{EXP}(-g * t)) + (c * \text{EXP}(-h * t))$

หมายเหตุ เมื่อ a b c g h k₁ k₂ n คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ , t คือ ระยะเวลาการอบ ณ ช่วงเวลาใดๆ (นาที่)
k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การอบแท้ง (ชั่วโมง⁻¹)

ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองที่สร้าง มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเพียงใด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง

$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทำนาย

$\overline{MR_{pre,i}}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากการทำนาย

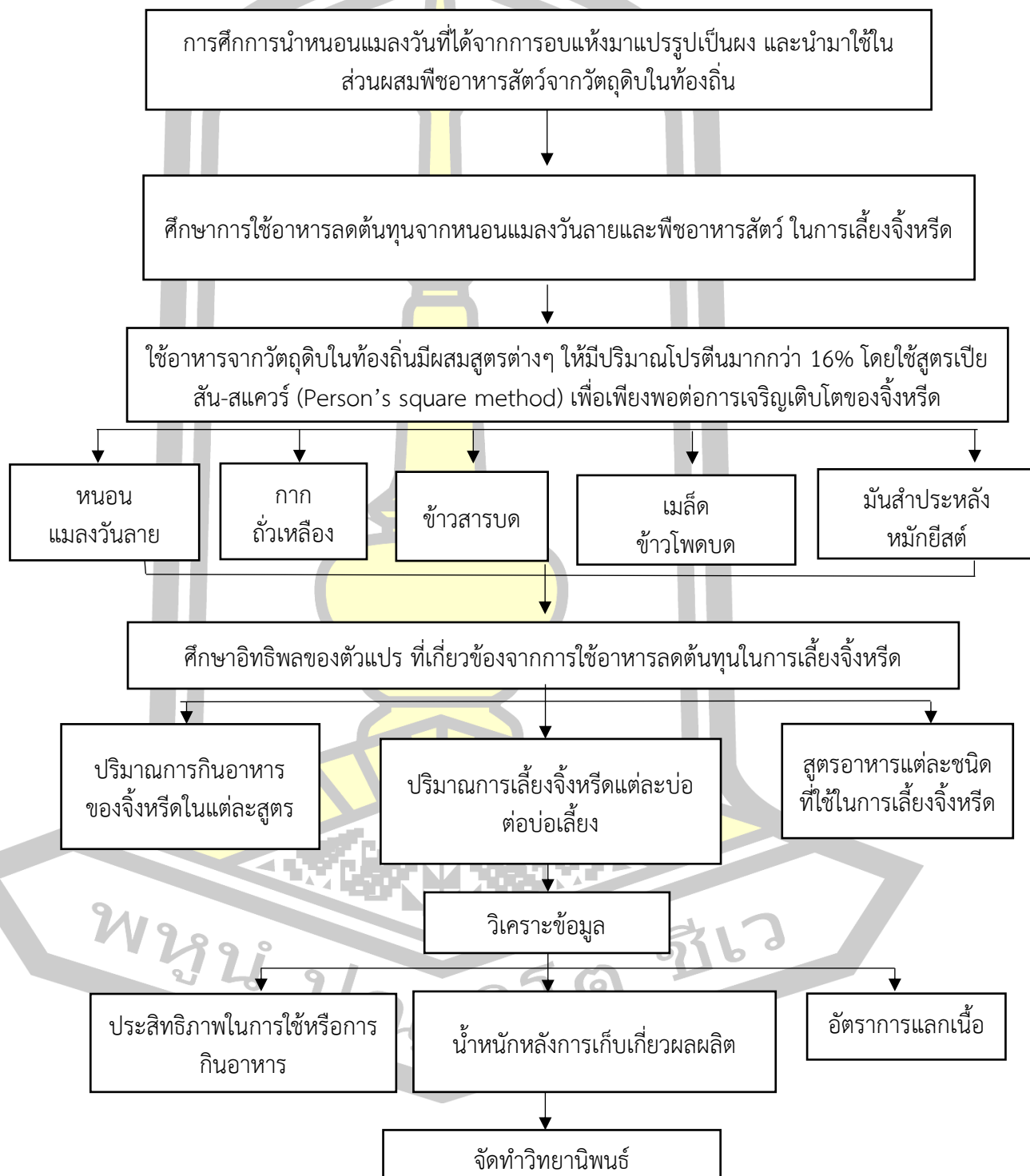
N คือ จำนวนชุดข้อมูลจากการทดลอง

n คือ จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

พหุ ประสิทธิภาพ

3.7 ศึกษาการลดต้นทุนอาหารจังหวัด โดยใช้หนอนแมลงวันลายและฟิซอาหารสัตว์ท้องถิ่น

การศึกษาอาหารลดต้นทุนจากหนอนแมลงวันลายและฟิซอาหารสัตว์ เป็นอาหารจังหวัด เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างถูกต้อง และบรรลุวัตถุประสงค์ จึงมีการศึกษาและทดสอบซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้



3.7.1 การทดสอบสูตรอาหารจากหนอนแมลงวันลายและฟีดอาหารสัตว์ท้องถิ่น ที่เหมาะสมในการเลี้ยงจิ้งหรีด

ในการทดลองจะเลี้ยงจิ้งหรีดพันธุ์ทองดำ และทองแดง(คละผสม) เนื่องจากเป็นที่นิยมเลี้ยงกันอย่างแพร่หลาย โดยมีการใช้วัตถุดิบจาก หนอนแมลงวันลาย กากถั่วเหลือง เมล็ดข้าวโพดบด และข้าวสารบด จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการเจริญเติบโต และต้นทุนของอาหาร

1) การศึกษาการเลี้ยงจิ้งหรีด

ในการทดลองการเลี้ยงจิ้งหรีด ผู้วิจัยต้องทำการศึกษาข้อมูลต่างๆ ในการเลี้ยงจิ้งหรีด ทั้งการเจริญเติบโต การเลี้ยงดู การให้อาหาร และการเก็บผลผลิต เพื่อให้ผู้วิจัยทำการทดลองให้สอดคล้องกับการเลี้ยงของเกษตรกรทั่วไป

2) การคำนวณสูตรอาหารจากหนอนแมลงวันลาย และฟีดอาหารสัตว์ท้องถิ่น

ในการคำนวณสูตรอาหารผู้วิจัยจะใช้สูตรการผสมอาหารเปียกสัน-สแควร์ (Person's square method) โดยทั่วไปแล้วในสูตรอาหารจะประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป การคำนวณสูตรอาหารโดยวิธีการเปียกสัน-สแควร์ มีขีดจำกัดว่าต้องหาจากส่วนผสมของวัตถุดิบ 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นหากจะใช้วัตถุดิบมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป จะต้องนำวัตถุดิบดังกล่าวมาผสมในสัดส่วนที่ต้องการให้ได้เป็นวัตถุดิบผสม 2 ชนิดก่อน แล้วจึงนำมาเทียบกลับเพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบแต่ละชนิดต่อไป

3) อุปกรณ์ในการทดลองการเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยสูตรอาหารจากหนอนแมลงวันลายและฟีดอาหารสัตว์ท้องถิ่น

3.1) กล่องสำหรับทดลองเลี้ยงจิ้งหรีดทองดำ และจิ้งหรีดทองแดง โดยใช้เป็นบ่อเลี้ยงจิ้งหรีด ขนาดความยาว 0.8 เมตร ความกว้าง 1.2 เมตร และความสูง 0.6 เมตร แสดงดังภาพที่

40



ภาพที่ 40 บ่อเลี้ยงจิ้งหรีด

3.2) แผงไข่ ไข่แผงไข่ ขนาดความกว้าง 29.50 เซนติเมตร ความยาว 29.50 เซนติเมตร และความสูง 4.50 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 แผงไข่

ที่มา: (thaipick.com/product/shopee/376569, 2566)

3.3) ถาดใส่อาหารและน้ำ ใช้ในการทดลองโดยเป็นพลาสติกลักษณะสีเหลือง ขนาด. แสดงดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ถาดใส่อาหารและน้ำ

ที่มา: (shopee.co.th/nanid_shop, 2566)

3.4) หิน โดยใช้เป็นหินก่อสร้าง ทำความสะอาดล้างด้วยน้ำ และฆ่าเชื้อในตู้อบความร้อน (hot oven) ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 หิน

ที่มา: (pstconcrete.com/th/articles/187797-%E0%B8%AB%E0%B8%B4%E0%B8%99, 2556)

3.5) เครื่องชั่งดิจิตอล SUNFORD รุ่น FEH5000



ภาพที่ 44 เครื่องชั่งดิจิตอล SUNFORD รุ่น FEH5000

ที่มา: (sunfordthai.com/15718914/-feh5000 -จอแอลซีดี-5กก1ก, 2566)

4) การทดลองสูตรอาหารในการเลี้ยงจิ้งหรีดจากหนอนแมลงวันลายและฟีดอาหารสัตว์ท้องถิ่น

ในการทดลองสูตรอาหารในการเลี้ยงจิ้งหรีด ได้มีการวางแผนการทดลอง Completely randomized design (CRD) มี 4 กรรมวิธี วิธีละ 3 ซ้ำ ได้แก่ 1) กรรมวิธีควบคุม คือ อาหารจิ้งหรีดสำเร็จรูป 2) สูตรอาหารลดต้นทุน แสดงดังตารางที่ 8 โดยสูตรอาหารสูตรที่ 2 ถึง 4 จะทำการเปรียบเทียบกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดสำเร็จรูป (กรรมวิธีควบคุม) ซึ่งในแต่ละซ้ำจะทำการเลี้ยงจิ้งหรีดอายุ 2-3 สัปดาห์ ในบ่ออียิปต์บอร์ด มีขนาดความยาว 0.8 เมตร ความกว้าง 1.2 เมตร และความสูง 0.6 เมตร

ตารางที่ 8 อัตราส่วนผสม สูตรการให้อาหารจิ้งหรีด

อัตราส่วนผสม	Recipe 1 (กิโลกรัม)	Recipe 2 (กิโลกรัม)	Recipe 3 (กิโลกรัม)	Recipe 4 (กิโลกรัม)
ผงหนอนแมลงวันลายบด	15.80	20.61	22.63	-
กากถั่วเหลืองบด	19.98	14.56	15.99	-
ข้าวโพดบด	31.61	29.12	31.97	-
ข้าวสารถบ	21.74	17.86	29.41	-
อาหารจิ้งหรีดสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์	10.87	17.86	-	100.00
น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	100.00	100.00	100.00	100.00
ความชื้น (%)	10.14	8.25	8.18	7.41

3.7.2 การศึกษาอัตราการเติบโตของจิ้งหรีด

การใช้วิธีการคำนวณเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของแมลง และอาหาร โดยการตรวจสอบผลการทดลองเมื่อแมลงอยู่ในช่วงระยะเต็มวัยสุดท้าย หรือพร้อมที่จะขยายพันธุ์ต่อไป นิยมใช้การคำนวณ ได้แก่ อัตราการเปลี่ยนอาหาร (Feed Conversion Ratio; FCR) ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงอาหาร ที่กินเข้าไปในหน่วยของสารในร่างกายน (Efficiency of conversation of ingested ; ECI) และประสิทธิภาพของการเปลี่ยนอาหารที่ย่อย (Efficiency of Donversion of Digested Material to Insect Biomass ; ECD) ซึ่งมีรายละเอียดของการคำนวณสูตรดังต่อไปนี้

1) อัตราการแลกเนื้อ หรืออัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Feed Conversion Ratio; FCR)

ในสูตรการคำนวณนี้ ในทางด้านปศุสัตว์ทั่วไป คือ การคำนวณเป็นปริมาณอาหาร (กิโลกรัม) ที่ต้องการเพื่อให้ได้น้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัมของสัตว์ที่ผลิต แต่ในส่วนของการงานด้านกีฏวิทยา มักนิยมใช้ประสิทธิภาพของการแปลงอาหารที่บริโภคนี้ในรูปแบบสูตร ECI ซึ่งเป็นมาตรการในการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว สสารแห้ง หรือมวลชีวภาพและในกรณีของ FCR ในแมลงจะถูกใช้ในการตรวจวัดของน้ำหนักสด หรือน้ำหนักแห้งโดยหน่วยถูกกำหนดให้เป็น กรัม หรือมิลลิกรัม หรือหน่วยย่อยที่เล็กกว่านั้น ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$\text{สูตรอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่ม (กรัม)}}$$

2) ประสิทธิภาพในการใช้อาหาร (Efficiency of conversation of ingested ; ECI)

ประสิทธิภาพของการแปลงอาหารที่กินเข้าไปเป็นหน่วยของสารอาหารในร่างกายน (Efficiency of conversation of ingested ; ECI) เป็นการคำนวณประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว ในแมลงมีค่าตรงข้ามกับอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (Oonincx et al.,2015) โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{สูตรประสิทธิภาพในการใช้อาหาร} = \frac{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่ม (กรัม)}}{\text{ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม)}} \times 100$$

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้มีการศึกษาการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของอาหารลดต้นทุนในการเลี้ยงจิ้งหรีด โดยศึกษาสภาวะการอบแห้ง พฤติกรรมการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง ค่าสิ้นเปลืองพลังงาน สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคอลด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนแบบถาดหมุน และมีการทดลองอาหารลดต้นทุนที่เหมาะสมในการเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ โดยมีการทดลองสูตรอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดในห้องทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ หนอนแมลงวันลาย กากถั่วเหลือง ข้าวโพด ข้าวสาลี และมันหมักยีสต์ เพื่อนำไปเป็นส่วนผสมอาหารลดต้นทุน โดยมีอาหารลดต้นทุนที่จะศึกษาทั้งหมด 3 สูตรได้ผลการทดลองดังนี้

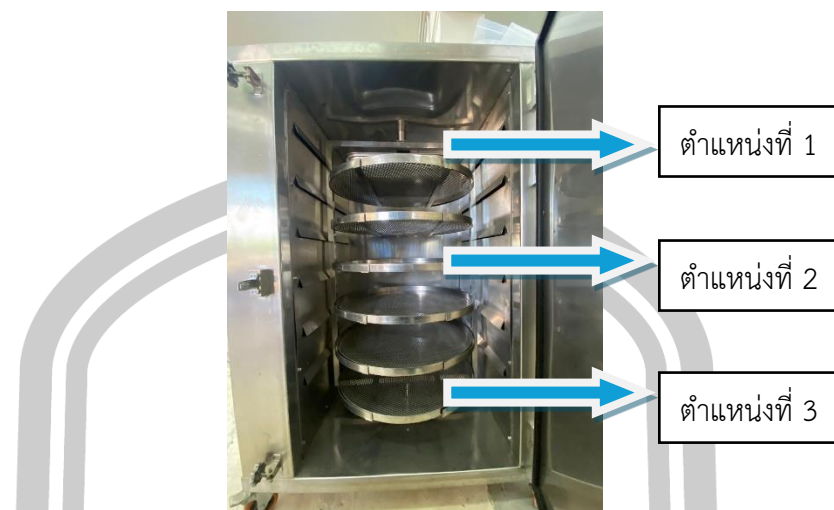
4.1 การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดหมุน

4.1.1 ผลการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

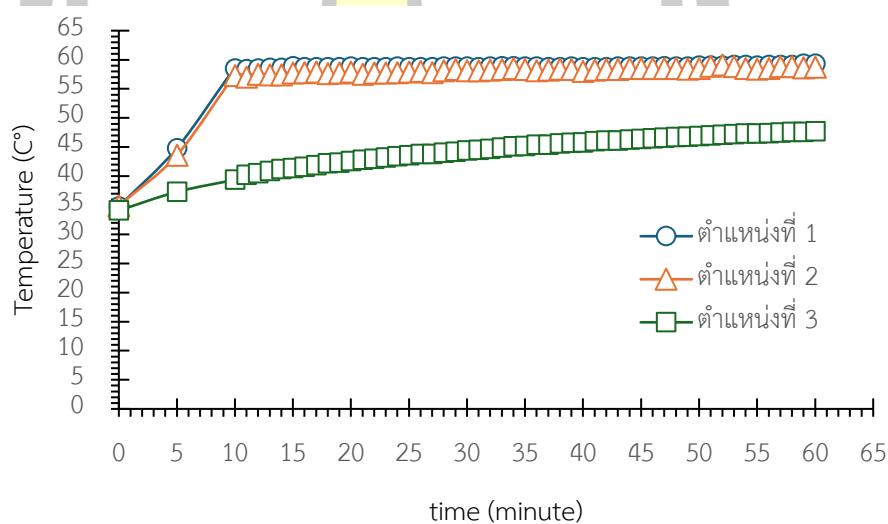
ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน โดยมีการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3000 วัตต์ และโบว์เวอร์ที่มีกำลังไฟในการนำพาความร้อนเท่ากับ 250 วัตต์ ซึ่งทำการวัดด้วยแอมมิเตอร์ยี่ห้อ TEXNELE รุ่น 6IN1 Din Rail monitor จากการทดสอบการกระจายอุณหภูมิอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 0 m/s และที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.5 m/s ระยะเวลาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบให้อุณหภูมิคงที่เฉลี่ย 10 นาที แต่อย่างไรก็ตามปริมาณในการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ความเร็ว 0 m/s และที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.5 m/s มีความแตกต่างกัน โดยความเร็ว 0 m/s มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.40 kwh และที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.5 m/s ปริมาณในการใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.53 kwh

4.1.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความเร็วลม 0 เมตร/วินาที และ ที่ความเร็วลม 4-5 เมตร/วินาที

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบ เพื่อให้ทราบอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบ โดยในการทดสอบการกระจายอุณหภูมิ ผู้วิจัยได้ศึกษาอุณหภูมิทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งถาดอบแห้งด้านบนสุด (ตำแหน่งที่ 1) ตำแหน่งถาดอบแห้งตรงกลาง (ตำแหน่งที่ 2) และตำแหน่งถาดอบแห้งด้านล่างสุด (ตำแหน่งที่ 3) ดังภาพที่ 45 ก่อนทำการทดสอบการอบแห้งหนอนแมลงวันลายเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบต่อไป



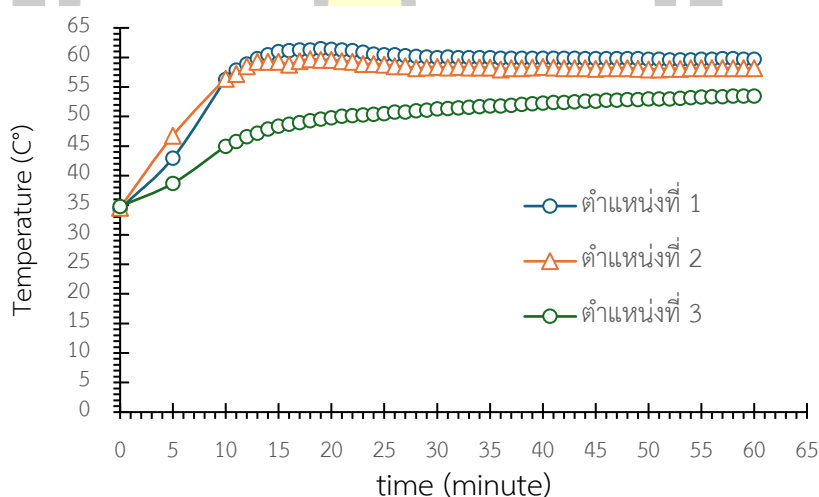
ภาพที่ 45 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบ



ภาพที่ 46 อุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบ

จากภาพที่ 46 แสดงค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องอบ โดยใช้ความเร็วลมที่ 0 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านบน (ตำแหน่งที่ 1) มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 58.8 องศาเซลเซียส ตำแหน่งตรงกลาง (ตำแหน่งที่ 2) มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 57.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามที่อุณหภูมิควบคุมไว้ แต่ในส่วนของตำแหน่งด้านล่าง (ตำแหน่งที่ 3) การกระจายอุณหภูมิมีความแตกต่างจาก 2 ตำแหน่งแรก โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 44.3 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิมีความแตกต่างกันประมาณ 12 องศาเซลเซียส

และจากข้อมูลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 47 พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านบน (ตำแหน่งที่ 1) มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 60.2 องศาเซลเซียส ตำแหน่งตรงกลาง (ตำแหน่งที่ 2) มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 59.2 องศาเซลเซียส และในส่วนของตำแหน่งด้านล่าง (ตำแหน่งที่ 3) มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 52 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับความเร็วลมที่ 0 เมตร/วินาที จากการเพิ่มความเร็วลมเป็น 6 เมตร/วินาที อุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 3 การกระจายอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 44.3 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 52 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้ความเร็วลมมาช่วยในการกระจายความร้อน โดยอาศัยการพาความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าไปสู่ห้องอบได้มากขึ้น จึงสรุปได้ว่าการศึกษาในการเปรียบเทียบการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิความร้อน ผู้วิจัยควรเลือกใช้ตำแหน่งด้านบน แต่ไม่ควรเกินตำแหน่งตรงกลางภายในห้องอบ สำหรับการศึกษาการอบแห้งหนอนแมลงวันลายเพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้อง



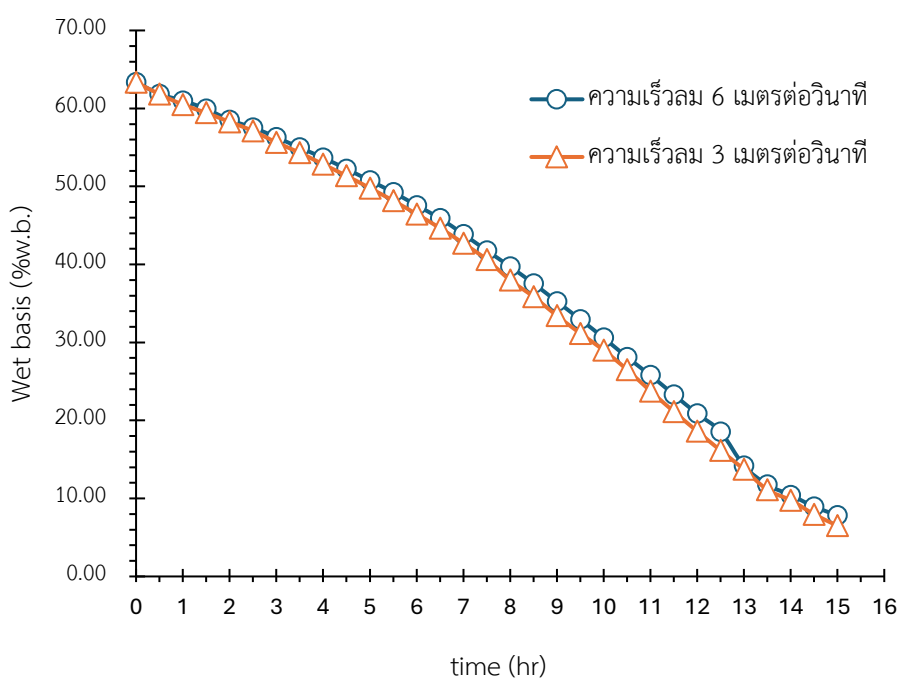
ภาพที่ 47 ข้อมูลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ความเร็วลม 4.5 เมตร/วินาที

4.2 การศึกษาปัจจัยการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

การทดลองนี้จะศึกษาสภาวะการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนทำการ การศึกษาสภาวะการอบแห้งแต่ละปัจจัย โดยปัจจัยในการศึกษา คือ ความเร็วลม (3 m/s 6 m/s) ความเร็วรอบการหมุนลาด (0 rpm, 5 rpm, 10 rpm) ความหนา (5 mm 10 mm) วิเคราะห์หาสภาวะในการอบแห้งแต่ละปัจจัย และระยะเวลาในการอบแห้ง

4.2.1 การศึกษาปัจจัยความความเร็วลมของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายน้ำหนัก 500 กรัม (ความหนา 5 มิลลิเมตร) โดยหนอนแมลงวันลายมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 63.3 %w.b ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 3 เมตร/วินาที และความเร็วลม 6 เมตร/วินาที แสดงดังภาพที่ 48 พบว่าการอบแห้งที่ความเร็วลมสูง (6 m/s) มีอัตราการลดลงของความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.%) ใกล้เคียงกับความเร็วลมต่ำ (3 m/s) โดยใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 15 ชั่วโมงเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามจากการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าด้วยแอมมิเตอร์ไฟฟ้า พบว่าที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าความเร็วลม 3 เมตร/วินาที โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ความเร็วลม 6 เมตร/วินาที อยู่ที่ 20.48 kwh ส่วนที่ความเร็วลม 3 เมตร/วินาที ใช้พลังงานไฟฟ้า อยู่ที่ 16.56 kwh จึงสรุปได้ว่า การใช้ตู้อบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุนที่ความเร็วลมต่างกันไม่มีผลต่ออัตราการการลดลงของความชื้นของหนอนแมลงวันลาย กับระยะเวลาในการอบแห้ง แต่จะทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเกินความจำเป็นในกระบวนการอบแห้ง แสดงดังในตารางที่ 9



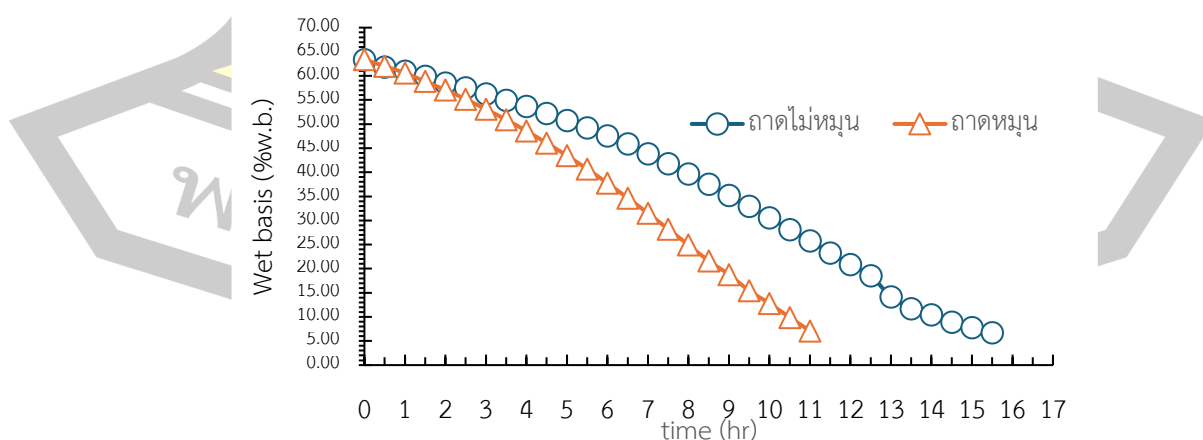
ภาพที่ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุน (ปัจจัยความเร็วลม)

ตารางที่ 9 ข้อมูลการศึกษาปัจจัยความความเร็วลมของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

รายการ	อุณหภูมิความร้อนที่ 60 °C	
	3 เมตร/วินาที	6 เมตร/วินาที
น้ำหนักหนอนแมลงวันลายเฉลี่ยก่อนอบ(g)	500.50	500.49
ความชื้นก่อนการอบเฉลี่ย (%w.b.)	63.35	63.31
มวลแห้งหนอนแมลงวันลายเฉลี่ย (g dry solid)	183.44	183.29
ความชื้นหลังการอบเฉลี่ย (%w.b.)	5.93	7.12
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งเฉลี่ย(kWh)	16.56	20.48
ระยะเวลาในการอบแห้ง (hr)	15	15

4.2.2 การศึกษาปัจจัยความเร็รรอบการหมุนถาดอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

ผลการทดลองการอบแห้งที่ความเร็รรอบการหมุนถาดอบในการเปรียบเทียบระหว่างการไม่หมุนถาด (0 rpm) กับการหมุนถาดที่ความเร็รรอบ 10 rpm ที่อุณหภูมิอบแห้งคงที่ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นเริ่มต้นหนอนแมลงวันลายเฉลี่ย 63.3 %w.b แสดงดังภาพที่ 49 พบว่าปัจจัยการหมุนส่งผลต่ออัตราการลดลงของความชื้นในการอบ โดยการอบแห้งที่ความเร็รรอบ 10 rpm สามารถเพิ่มอัตราการลดลงของความชื้นในหนอนแมลงวันลาย และลดระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าระบบคงที่ (ไม่หมุน) จึงสรุปได้ว่าการใช้เทคนิคการหมุนถาดในกระบวนการอบแห้งสามารถลดระยะเวลาและเพิ่มอัตราการลดลงของความชื้นได้มากขึ้น เมื่อเทียบการอบแห้งที่ไม่หมุนถาด แสดงดังตารางที่ 10



ภาพที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับถาดหมุนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุนปัจจัยการหมุนถาด

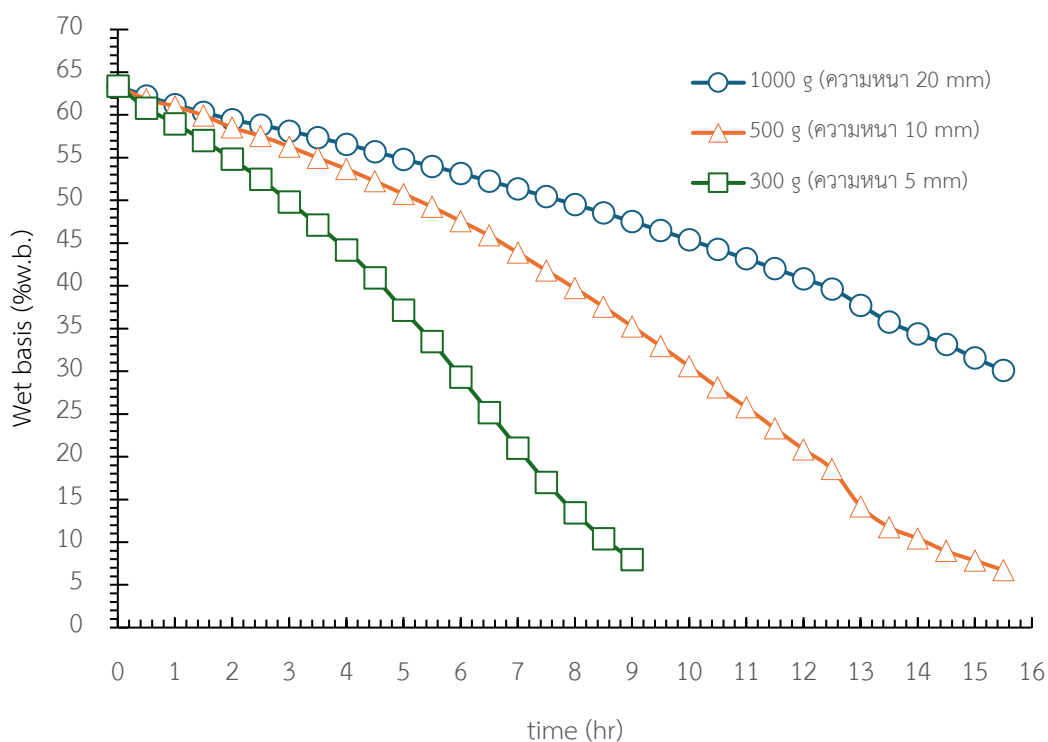
ตารางที่ 10 ข้อมูลการศึกษาปัจจัยความเร็วรอบการหมุนกดอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบกดหมุน

รายการ	อุณหภูมิความร้อนที่ 60 °C	
	0 rpm*	10 rpm*
น้ำหนักหนอนแมลงวันลายเฉลี่ยก่อนอบ(g)	500.49	500.83
ความชื้นก่อนการอบเฉลี่ย (%w.b.)	63.3	63.3
มวลแห้งหนอนแมลงวันลายเฉลี่ย (g dry solid)	183.29	183.44
ความชื้นหลังการอบเฉลี่ย (%w.b.)	7.10	6.73
ระยะเวลาในการอบแห้ง (hr)	11	15.5

หมายเหตุ *หน่วยความเร็วรอบต่อนาที

4.2.3 การศึกษาปัจจัยความหนาของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบกดหมุน

จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่ความหนา 20 10 และ 5 มิลลิเมตร ความเร็วลม 6 m/s และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยหนอนแมลงวันลายมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 63.3 %w.b. แสดงดังตารางที่ 11 ซึ่งปัจจัยของความหนาส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยที่ความหนา 20 มิลลิเมตร มีการใช้เวลาที่มากกว่า 15 ชั่วโมง เพื่อให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียกต่ำกว่า 10% เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 10 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ที่ใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ที่ 15.5 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมงตามลำดับ ที่จะทำให้ความชื้นของหนอนแมลงวันลายต่ำกว่าความชื้นมาตรฐานแห้ง 10% แสดงดังภาพที่ 50 จึงสรุปได้ว่า ที่ความหนา 20 มิลลิเมตรไม่เหมาะที่จะมาใช้ในการกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อน เนื่องจากความหนาในการอบแห้งที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีเวลาในการอบที่เพิ่มสูงขึ้น และทำให้มีการใช้พลังงานมากกว่าเกินความจำเป็น ซึ่งจากการทดสอบนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การอบแห้งที่ความหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบาง ด้านการใช้พลังงาน และระยะเวลาในการอบแห้งต่อไป



ภาพที่ 50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับเวลา (ชั่วโมง) การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุน (ปัจจัยน้ำหนัก-ความหนาในการอบ)

ตารางที่ 11 ข้อมูลการศึกษาปัจจัยความหนาของการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดหมุน

รายการ	อุณหภูมิความร้อนที่ 60 °C ความเร็วลม 5 m/s		
	20 mm *	10 mm *	5 mm *
น้ำหนักหนอนแมลงวันลายเฉลี่ยก่อนอบ(g)	1000	500	300
ความชื้นก่อนการอบเฉลี่ย (%w.b.)	63.37	63.37	63.31
มวลแห้งหนอนแมลงวันลายเฉลี่ย (g dry solid)	366.51	183.29	109.94
ความชื้นหลังการอบเฉลี่ย (%w.b.)	<10	6.69	5.59
ระยะเวลาในการอบแห้ง (hr)	<15	15.5	9

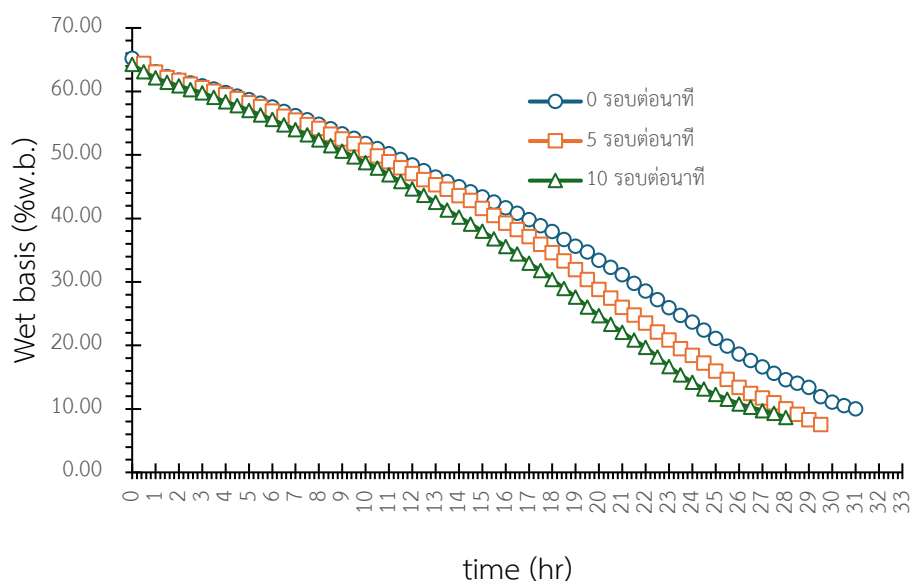
*ขนาดถาดทดลองกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 34 เซนติเมตร สูง 8 เซนติเมตร

4.3 พฤติกรรมการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

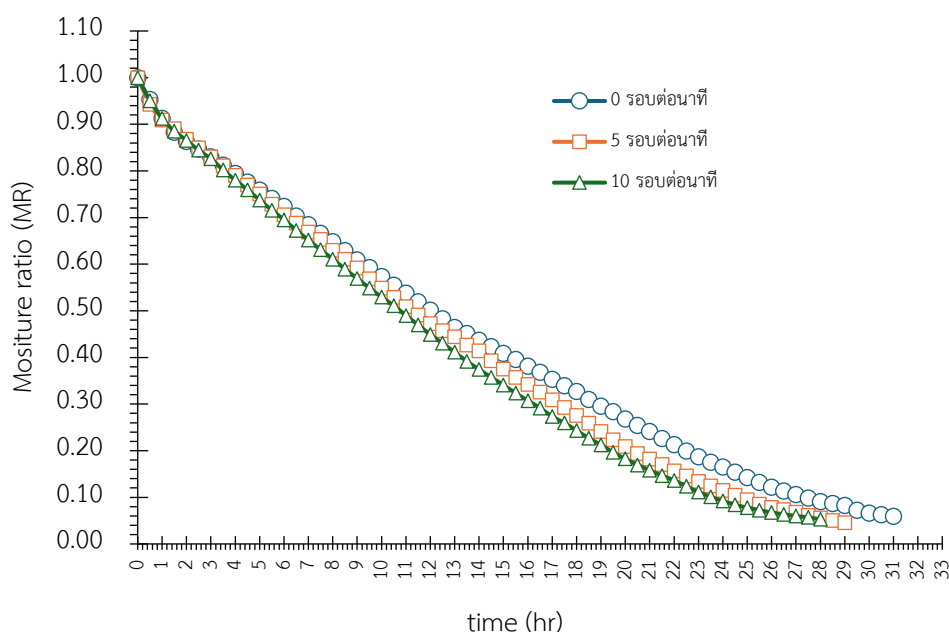
4.3.1 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 50 องศา

จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยในช่วง 64.2 – 65.1 %w.b. โดยนำหนอนแมลงวันลายนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตร/วินาที และความเร็วรอบในการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที แสดงดังภาพที่ 51 พบว่าเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนถาดอบแห้ง จะส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ซึ่งความเร็วรอบที่ 10 รอบต่อนาทีมีการใช้ระยะเวลาเร็วที่สุดเท่ากับ 28 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 5.50 %w.b. รองลงมา คือ ความเร็วรอบที่ 5 รอบต่อนาที และ ความเร็วรอบที่ 0 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 29 และ 31 ชั่วโมง โดยความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 6.8%w.b และ 7.5%w.b ตามลำดับ

และจากภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่ความเร็วรอบการหมุนถาด ในระดับต่างๆ โดยอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วรอบการหมุนถาดอบแห้งที่ 10 รอบต่อนาที จะพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะมีระยะเวลาที่สั้นกว่า ความเร็วรอบ 5 และ 0 รอบต่อนาที เนื่องจาก การเพิ่มความเร็วในการหมุนถาดการอบแห้ง เป็นการเพิ่มการกระจายอุณหภูมิ และเป็นการเพิ่มการสัมผัสลมร้อนให้กับหนอนแมลงวันลาย ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง



ภาพที่ 51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับถาดหมุนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



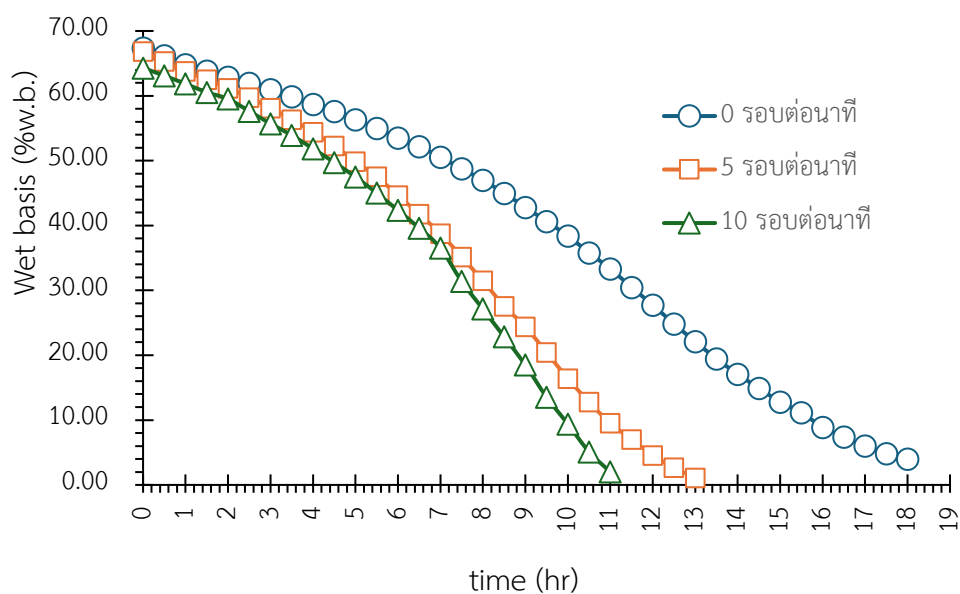
ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (ชั่วโมง) ของการอบแห้งด้วย ตู้อบลมร้อนแบบภาตหมุนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

4.3.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบภาตหมุนที่อุณหภูมิ 60 องศา

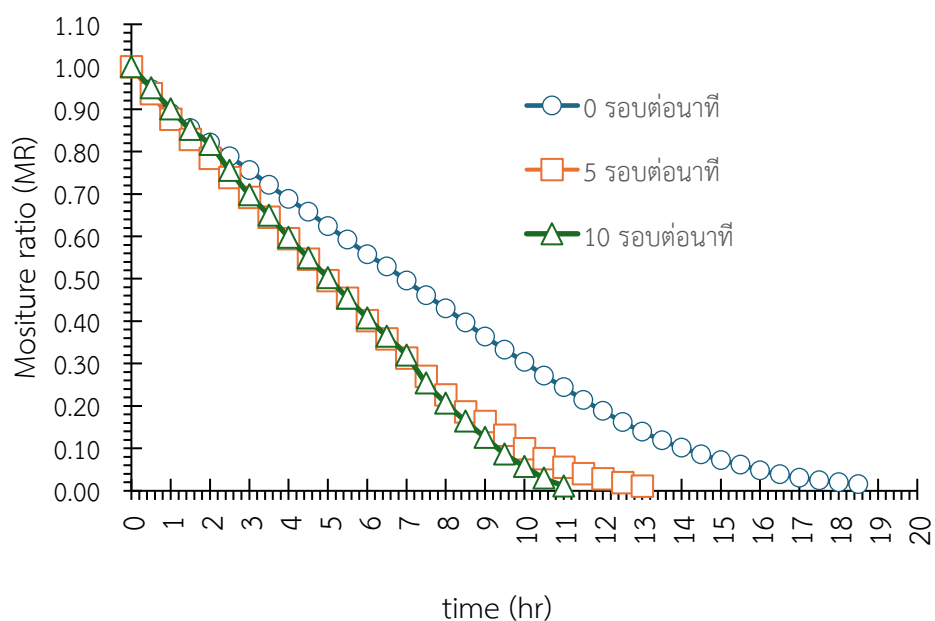
จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยในช่วง 64.2 – 67.1 %w.b. โดยนำหนอนแมลงวันลายนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตร/วินาที และความเร็วรอบในการหมุนภาต 0 5 และ 10 รอบต่อนาที แสดงดังภาพที่ 53 พบว่าเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนภาตอบแห้ง จะส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย โดยที่ความเร็วรอบที่ 10 รอบต่อนาทีที่มีการใช้ระยะเวลาเร็วที่สุดเท่ากับ 11 ชั่วโมง โดยมีความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 5.7 %w.b. รองลงมา คือ ความเร็วรอบที่ 5 รอบต่อนาที และความเร็วรอบที่ 0 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 13 และ 18 ชั่วโมง โดยความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 5.25 %w.b. และ 5.5%w.b. ตามลำดับ

และจากภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่ความเร็วรอบการหมุนภาต ในระดับต่างๆ โดยอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วรอบการหมุนภาตอบแห้งที่ 10 รอบต่อนาที จะพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะมีระยะเวลาที่สั้นกว่า ความเร็วรอบ 5 และ 0 รอบต่อนาที เนื่องจาก การเพิ่มความเร็วในการหมุนภาตการอบแห้ง เป็นการเพิ่มการกระจายอุณหภูมิ และเป็น

การเพิ่มการสัมผัสความร้อนให้กับหนอนแมลงวันลาย ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับลาดหมุนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบลาดหมุนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

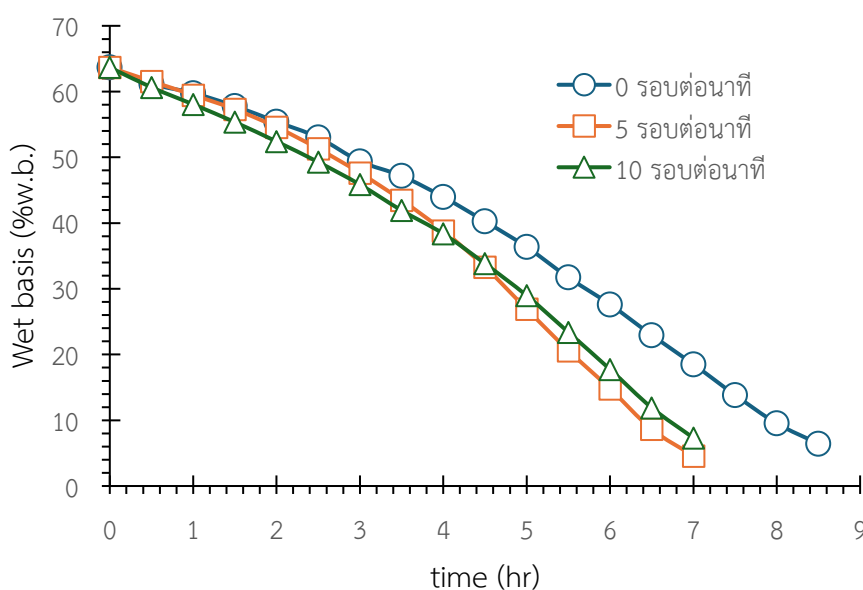


ภาพที่ 54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (ชั่วโมง) ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบลาดหมุนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

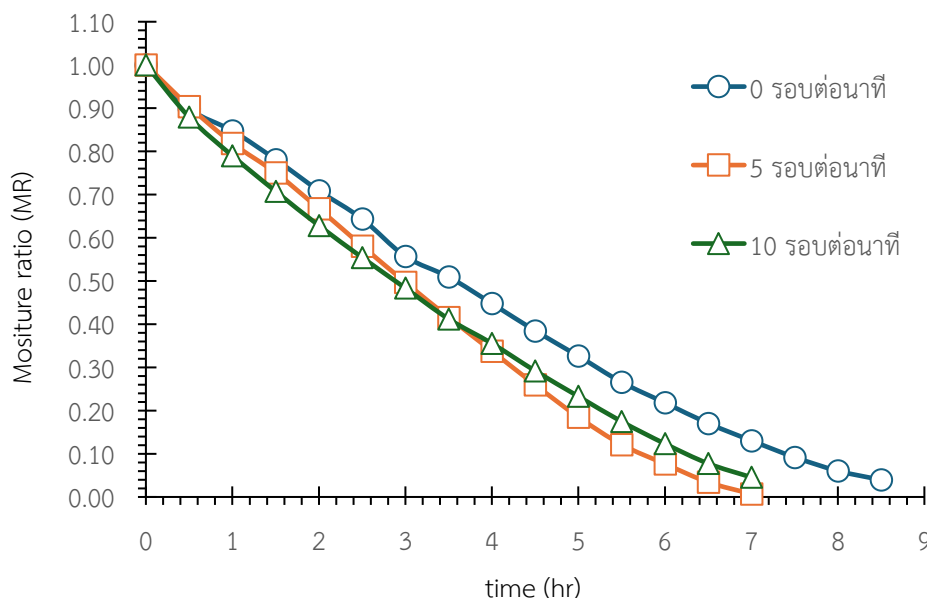
4.3.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 70 องศา

จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยในช่วง 63.6 – 65.1 %w.b. โดยนำหนอนแมลงวันลายนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตร/วินาที และความเร็วรอบในการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 55 พบว่าเมื่อเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนถาดอบแห้ง จะส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย โดยที่ความเร็วรอบที่ 10 รอบต่อนาที และความเร็วรอบที่ 5 รอบต่อนาที มีการใช้ระยะเวลาเร็วที่สุดเท่ากับ 7 ชั่วโมง โดยมีความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 5.1 %w.b. และในส่วนความเร็วรอบที่ 0 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากับ 8.5 ชั่วโมง โดยความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 4.1 %w.b.

และจากภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่ความเร็วรอบการหมุนถาด ในระดับต่างๆ โดยอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลา และที่ความเร็วรอบการหมุนถาดอบแห้งที่ 10 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการหมุนถาดอบแห้งที่ 5 รอบต่อนาที จะพบว่าอัตราส่วนความชื้นจะมีระยะเวลาที่สั้นกว่าความเร็วรอบ 0 รอบต่อนาที เนื่องจาก การเพิ่มอุณหภูมิ และการเพิ่มความเร็วในการหมุนถาดการอบแห้ง เป็นอุณหภูมิลมร้อน การกระจายของอุณหภูมิ และเป็นการเพิ่มการสัมผัสลมร้อนให้กับหนอนแมลงวันลาย ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นฐานเปียก (%w.b.) กับถาดหมุนเวลา (ชั่วโมง)ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลา (ชั่วโมง) ของการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบาง

จากข้อมูลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน ที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลทั้งหมด 8 สมการตามตารางที่ 7 เมื่อนำข้อมูลการอบแห้งมาทำการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น ซึ่งเป็นการแสดงส่วนสำคัญระหว่างความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง โดยนำมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์แบบต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่เหมาะสม สำหรับการใช้อธิบาย พฤติกรรม การอบแห้งชั้นบาง ซึ่งแบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองได้ดีต้องมีการพิจารณาจากค่า R^2 ที่สูงสุด ส่วน RMSE และ χ^2 ที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ โดยที่มีค่าพารามิเตอร์แบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 12-20 โดยจากตารางจะแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนถาดหมุน สำหรับใช้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ และให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่อธิบายผลการทดลองที่ดีที่สุดดังต่อไปนี้

4.4.1 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 50 ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที

ตารางที่ 12 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 0 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9740	0.01966	0.03995
Page	0.9900	0.00867	0.01791
Modified page	0.9900	0.03192	0.06593
Henderson&pabis	0.9770	0.06135	0.12671
Logarithmic	0.9600	2.42398	5.09037
Two term	0.9770	0.06135	0.13101
verma et al	0.9890	0.22305	0.46841
modified Henderson & pabis	0.9770	0.06008	0.13282

ตารางที่ 13 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 5 รอบต่อนาที

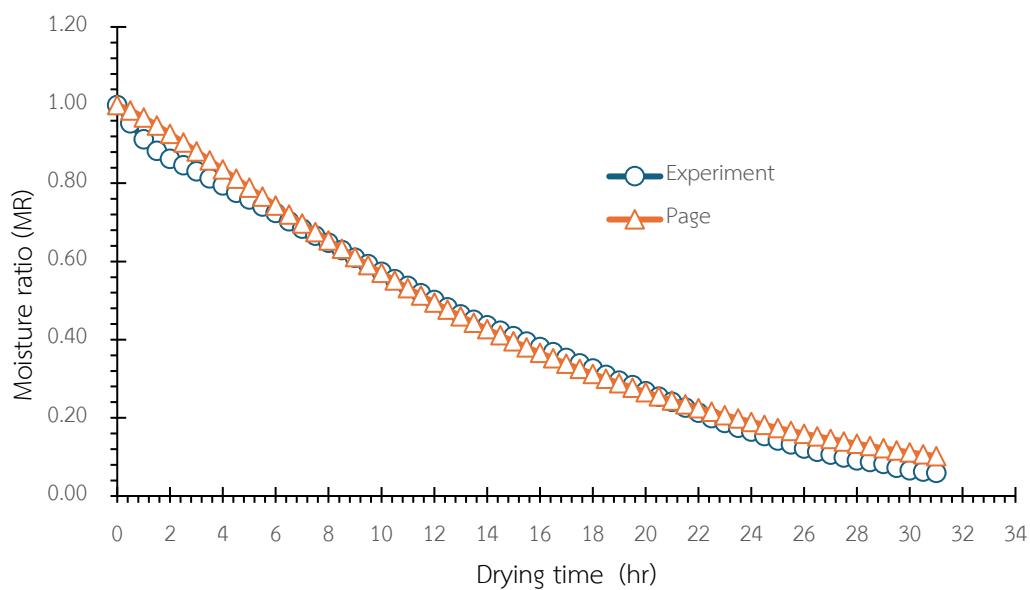
Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9670	0.07532	0.15324
Page	0.9900	0.00435	0.00900
Modified page	0.9720	0.11556	0.23923
Henderson & pabis	0.9720	0.17570	0.36374
Logarithmic	0.9980	0.02794	0.05888
Two term	0.9720	0.17570	0.37697
verma et al	0.9980	0.05363	0.11300
modified Henderson & pabis	0.9720	0.07675	0.17088

ตารางที่ 14 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 10 รอบต่อนาที

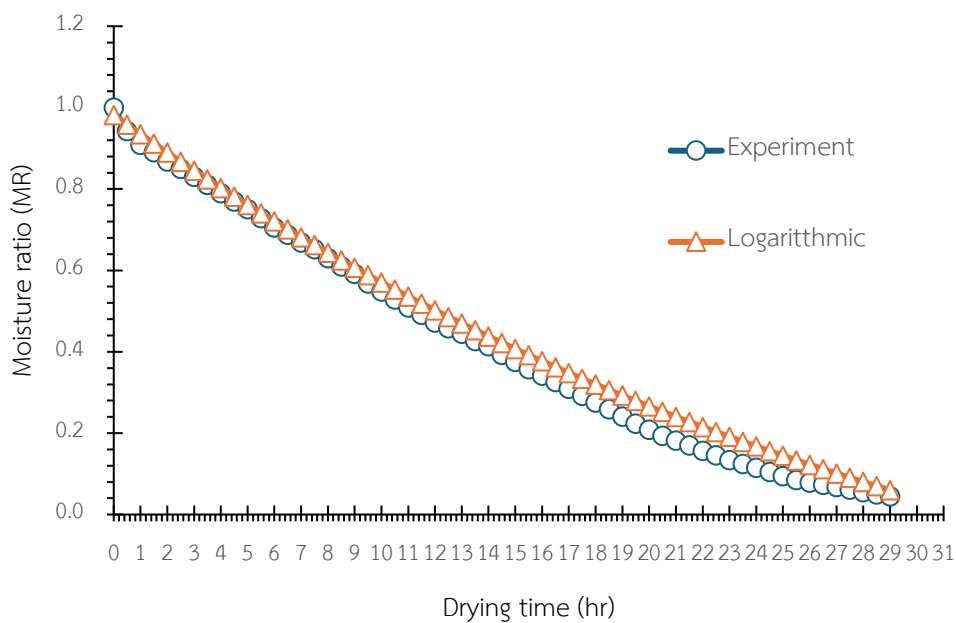
Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9700	0.12825	0.26108
Page	0.9920	0.18853	0.39077
Modified page	0.9920	0.18853	0.39077
Henderson & pabis	0.9750	0.25612	0.53087
<u>Logarithmic</u>	<u>0.9980</u>	<u>0.00016</u>	<u>0.00035</u>
Two term	0.9950	0.60367	1.29845
verma et al	0.9980	0.25112	0.53015
modified Henderson & pabis	0.9750	0.25612	0.57251

จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วการหมุนถาด 0 รอบต่อนาที พบว่าแบบจำลองของ Page ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9900 RMSE เท่ากับ 0.00867 และ ค่า χ^2 เท่ากับ 0.01791 ดังภาพที่ 57 ส่วนความเร็วการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9980 RMSE เท่ากับ 0.02794 และ ค่า χ^2 เท่ากับ 0.05888 ดังภาพที่ 58 และความเร็วการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมที่สุด เช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9980 RMSE เท่ากับ 0.00016 และ ค่า χ^2 เท่ากับ 0.00035 ดังภาพที่ 59

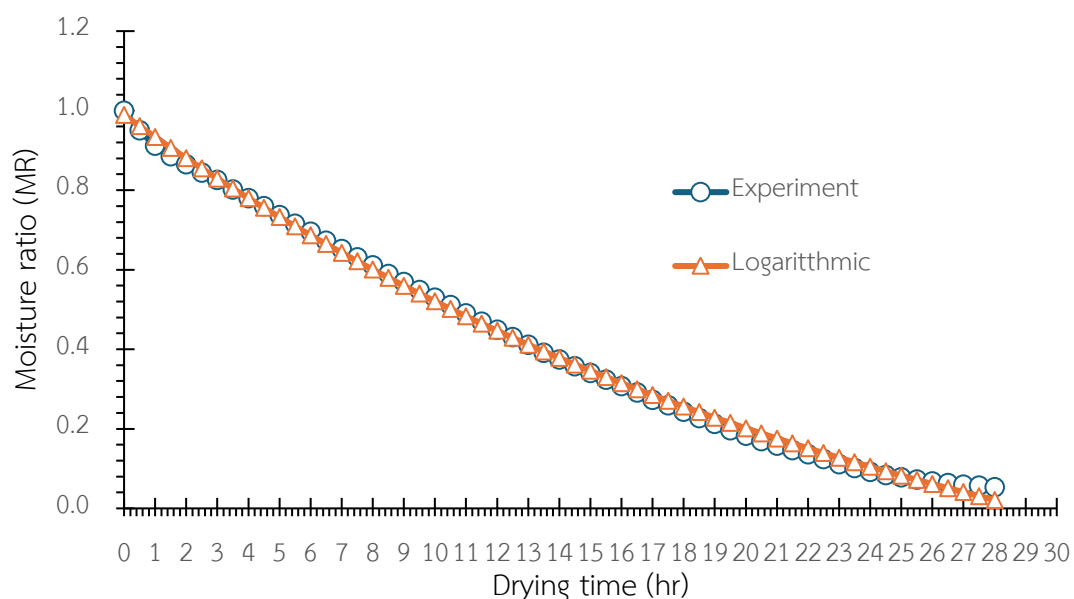
พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพที่ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุน 0 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Page



ภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุน 5 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic



ภาพที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic

4.4.2 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที

ตารางที่ 15 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 0 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9540	0.00170	0.00349
Page	0.9895	0.00623	0.01316
Modified page	0.9890	0.00099	0.00208
Henderson & pabis	0.9631	0.00360	0.00759
<u>Logarithmic</u>	<u>0.9960</u>	<u>0.00030</u>	<u>0.00066</u>
Two term	0.9631	0.03534	0.07900
verma et al	0.9960	0.83342	1.80971
modified Henderson & pabis	0.9892	0.00206	0.00490

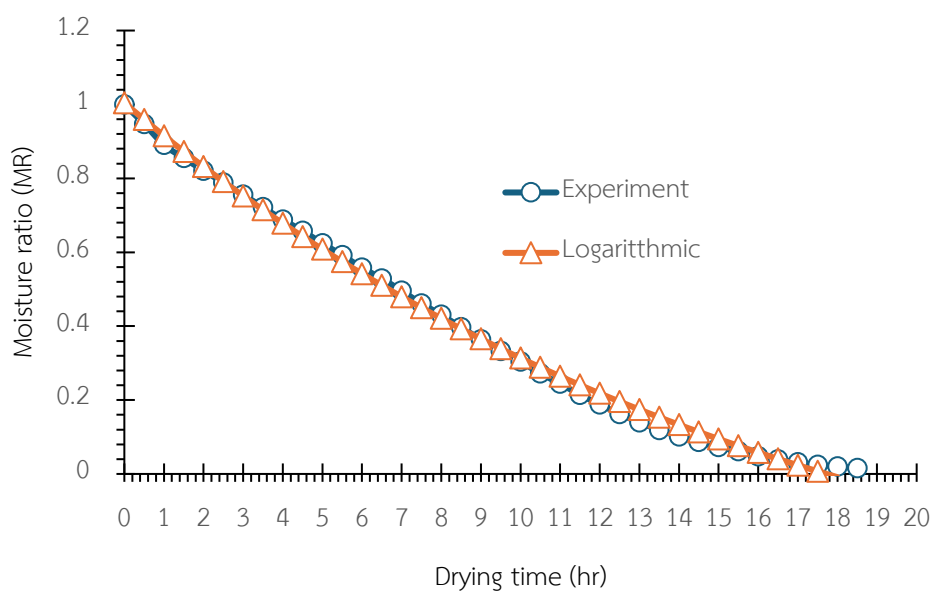
ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 5 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9489	0.00042	0.00088
Page	0.9917	0.00012	0.00027
Modified page	0.9920	0.00566	0.01223
Henderson & pabis	0.9603	0.00230	0.00498
<u>Logarithmic</u>	<u>0.9962</u>	<u>0.00111</u>	<u>0.00250</u>
Two term	0.9603	0.00727	0.01706
verma et al	0.9505	0.00181	0.00408
modified Henderson & pabis	0.9600	0.00727	0.01869

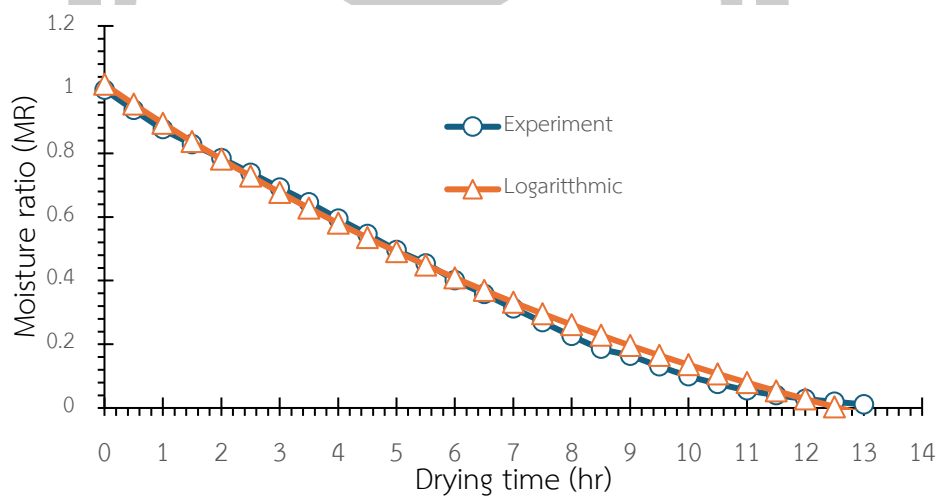
ตารางที่ 17 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 10 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9276	0.00022	0.00046
Page	0.9888	0.00116	0.00254
Modified page	0.9890	0.00504	0.01103
Henderson & pabis	0.9450	0.00162	0.00355
<u>Logarithmic</u>	<u>0.9987</u>	<u>0.01445</u>	<u>0.03324</u>
Two term	0.9450	0.00078	0.00188
verma et al	0.9821	0.82641	1.90075
modified Henderson & pabis	0.9240	0.00593	0.01605

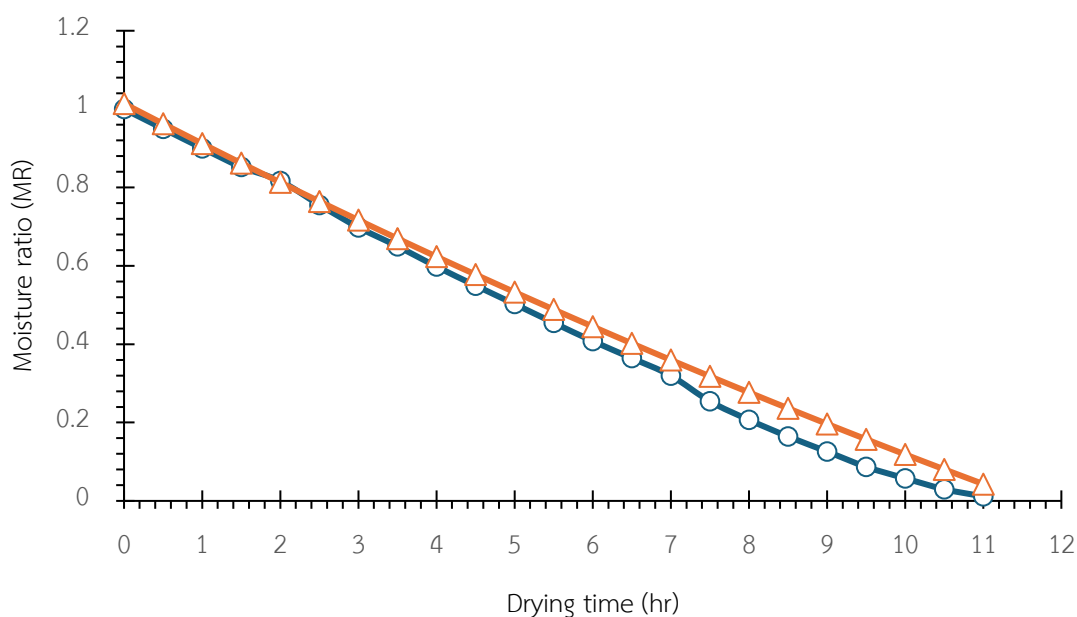
จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 3 เงื่อนไขของความเร็วการหมุนถาด โดยมีค่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9960-0.9987 RMSE เท่ากับ 0.00030 0.0111 และ 0.01445 ตามลำดับ และในส่วนค่า χ^2 มีค่าเท่ากับ 0.00066 0.0025 และ 0.03324 ตามลำดับ โดยกราฟเส้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วการหมุนถาด 0 5 และ 10 รอบต่อนาที แสดงดังภาพที่ 60 61 และ 62 ตามลำดับ



ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุน 0 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic



ภาพที่ 61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุน 5 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic



ภาพที่ 62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic

4.4.3 การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดหมุนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0.5 และ 10 รอบต่อนาที

ตารางที่ 18 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 0 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9582	0.00000	0.00000
Page	0.9926	0.00060	0.00135
Modified page	0.9926	0.00209	0.00470
Henderson & pabis	0.9668	0.00087	0.00195
Logarithmic	0.9988	0.00223	0.00535
Two term	0.9668	0.00286	0.00736
verma et al	0.9988	1.01222	2.42934
modified Henderson & pabis	0.9668	0.00259	0.00777

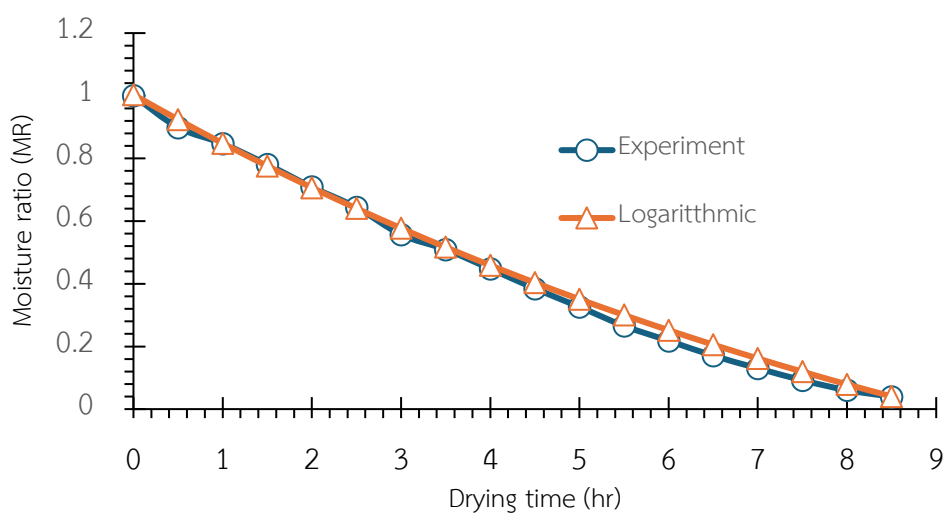
ตารางที่ 19 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 5 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9382	3.18E-05	6.81E-05
Page	0.9896	6.03E-03	1.39E-02
Modified page	0.9896	1.46E-03	3.38E-03
Henderson & pabis	0.9499	1.03E-03	2.39E-03
<u>Logarithmic</u>	<u>0.9974</u>	<u>6.42E-04</u>	<u>1.60E-03</u>
Two term	0.9850	2.95E-01	8.04E-01
verma et al	0.9970	1.05E+00	2.62E+00
modified Henderson & pabis	0.9500	4.26E-03	1.42E-02

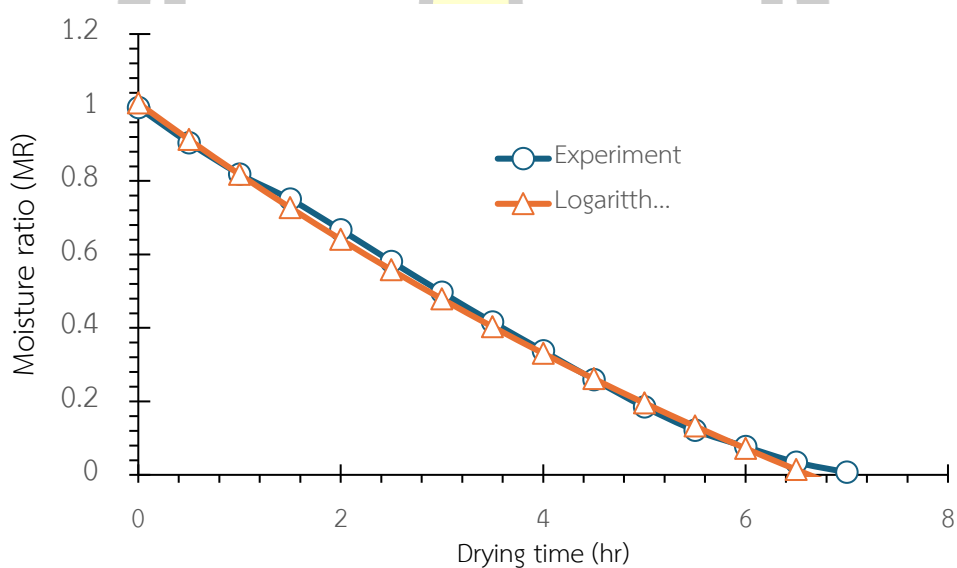
ตารางที่ 20 พารามิเตอร์ทางสถิติเพื่อใช้ในการเลือกแบบจำลองการอบแห้งที่เหมาะสมที่สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนถาดหมุน 10 รอบต่อนาที

Model	Statistical parameters for model selection		
	R^2	RMSE	χ^2
Newton	0.9710	0.00369	0.00790
Page	0.9900	0.00010	0.00023
Modified page	0.9900	0.00380	0.00878
Henderson & pabis	0.9750	0.00002	0.00005
<u>Logarithmic</u>	<u>1.0000</u>	<u>0.00128</u>	<u>0.00320</u>
Two term	0.9910	0.24640	0.67199
verma et al	0.9990	0.00412	0.01031
modified Henderson & pabis	0.9750	0.00003	0.00011

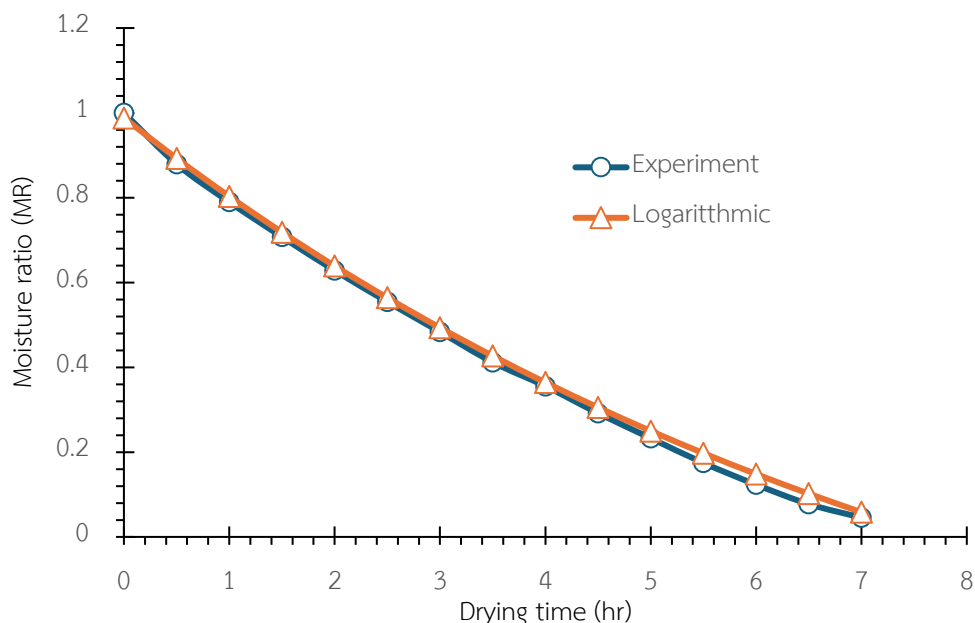
จากผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วการหมุนถาด 0.5 และ 10 รอบต่อนาที พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 3 เงื่อนไขของความเร็วการหมุนถาด โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9974-1.0000 RMSE เท่ากับ 0.00535 6.42E-04 และ 0.00128 ตามลำดับ และในส่วนค่า χ^2 มีค่าเท่ากับ 0.00066 1.60E-03 และ 0.00320 ตามลำดับ โดยกราฟเส้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วการหมุนถาด 0.5 และ 10 รอบต่อนาที แสดงดังภาพที่ 63 64 และ 65



ภาพที่ 63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุน 0 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic



ภาพที่ 64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุน 5 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic



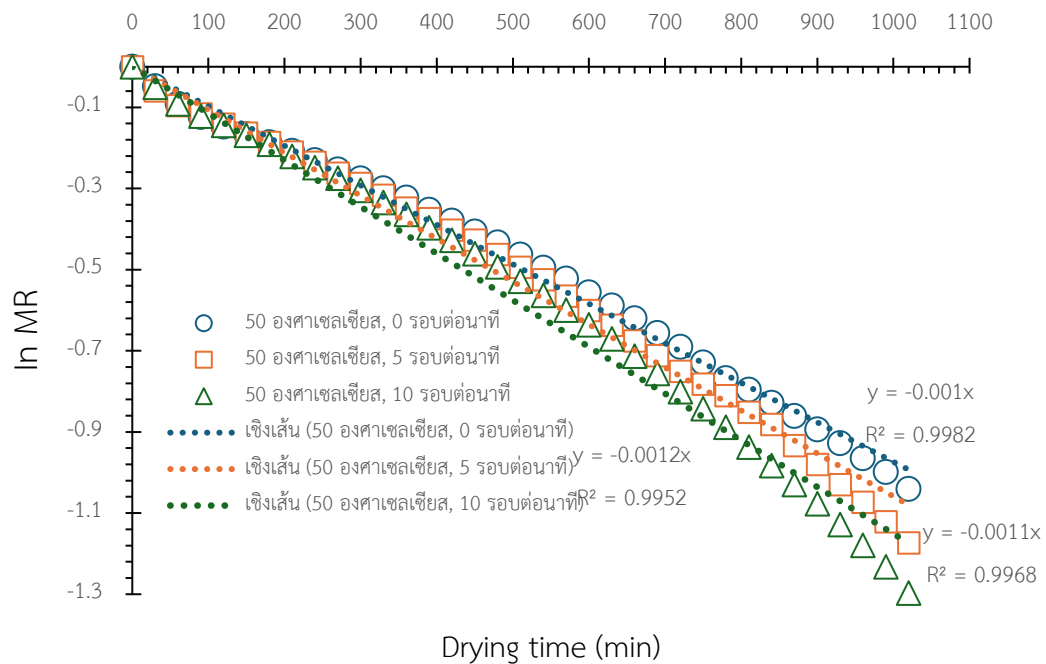
ภาพที่ 65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งจากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที เทียบกับแบบจำลอง Logarithmic

4.5 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

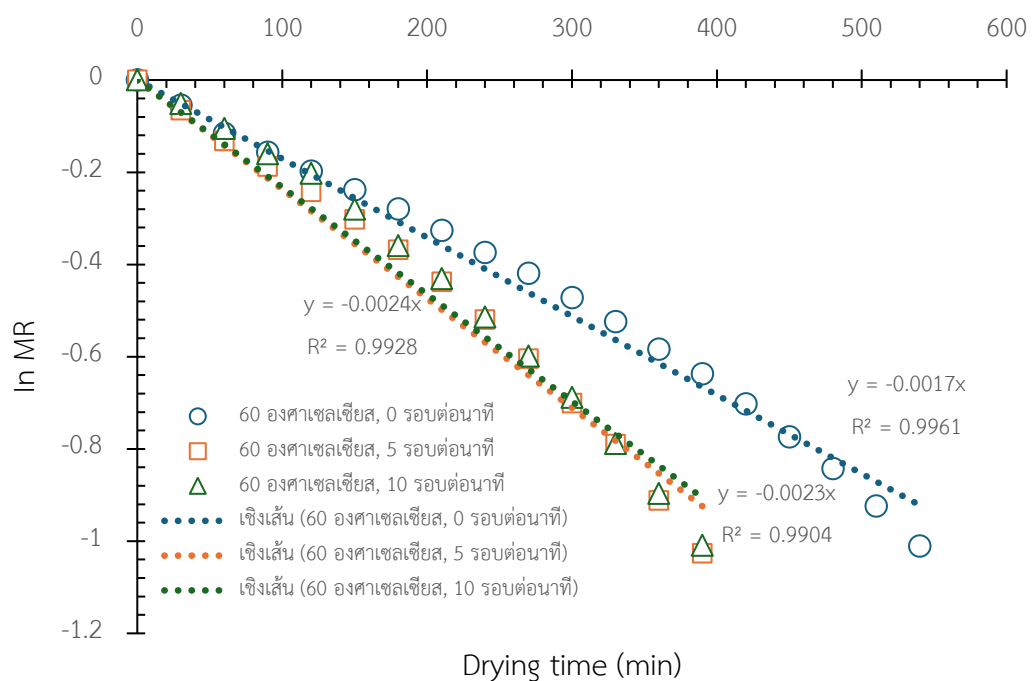
4.5.1 ผลของปัจจัยต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากการทดลอง ผลของปัจจัยที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล สำหรับการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยการหมุนถาดที่ความเร็วรอบ 0 5 และ 10 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนถาดหมุน (rotating tray drying)

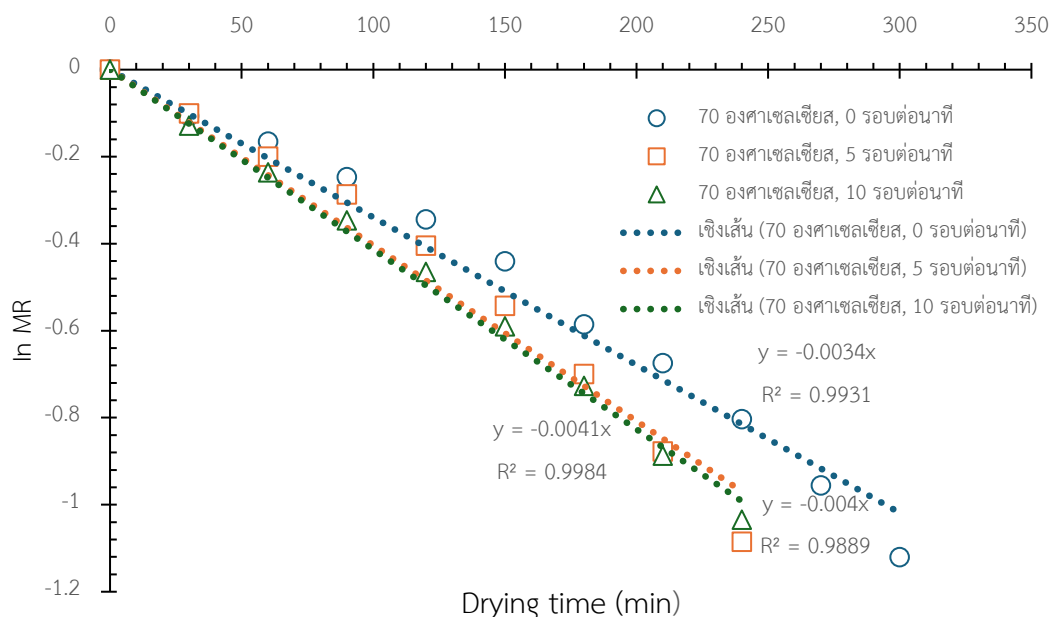
จากการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน (rotating tray drying) จากการเก็บข้อมูลน้ำหนักและเวลา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้มาเป็นตัวประมาณค่า จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) แสดงดังภาพที่ 66 67 และ 68 เพื่อทำการวิเคราะห์ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุนมีค่าอยู่ในช่วง 2.5330×10^{-9} ถึง 1.0385×10^{-8} และสำหรับการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมากกว่าการอบแห้งปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจากการทดสอบนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 1.0385×10^{-8} แสดงดังตารางที่ 21



ภาพที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบพัดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที



ภาพที่ 67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบพัดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที



ภาพที่ 68 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบถาดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที

ตารางที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย

Temperature (C°)	Rotating (rpm)	D_{eff} (m/s ²)
50	0	2.53303×10^{-9}
	5	2.78634×10^{-9}
	10	3.03964×10^{-9}
60	0	4.30616×10^{-9}
	5	5.82598×10^{-9}
	10	6.07928×10^{-9}
70	0	8.61232×10^{-9}
	5	1.01321×10^{-8}
	10	1.03854×10^{-8}

4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในกระบวนการอบแห้ง

จากปริมาณการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน แสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ ถาดหมุน (rpm)	เวลา (hr)	การใช้ไฟฟ้า (kw-h)				ค่าพลังงาน (บาท)
			Blower	Heater	Rotation	total	
50	0	31	4.724	0.520	0.000	20.838	87.10
	5	29.5	4.496	0.468	1.338	19.642	82.11
	10	28	4.267	0.516	0.825	19.544	81.69
60	0	18.5	2.819	0.790	0.000	17.443	72.91
	5	13	1.981	0.932	0.590	14.691	61.41
	10	11	1.676	1.041	0.324	13.451	56.23
70	0	9	1.372	1.500	0.000	14.875	62.18
	5	7	1.067	1.560	0.317	12.303	51.43
	10	7	1.067	1.485	0.206	11.670	48.78

หมายเหตุ ค่าพลังงานไฟฟ้า 4.18 บาทต่อหน่วย (ยูนิต)

จากตารางที่ 22 การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน เมื่อมีเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนจะทำให้ค่าพลังงานต่ำลง เนื่องจากการใช้เทคนิคการหมุนถาดอบแห้ง จึงทำให้วัตถุดิบได้รับลมร้อนอย่างทั่วถึงจึงทำให้อัตราการระเหยนํ้ามีความสม่ำเสมอ ทำให้ประหยัดพลังงาน และลดระยะเวลาในการอบแห้ง

4.7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนถาดหมุน (rotating tray drying) มีการกำหนดปัจจัยในการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม รอบการหมุน จะพิจารณาจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณค่าความพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ

โดยงานวิจัยพิจารณาค่าพลังงานสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบหนอนแมลงวันลายที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 64.1-67.1 %w.b. และมีการกำหนดความชื้นสุดท้าย ≤ 10 %w.b. และโดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 23

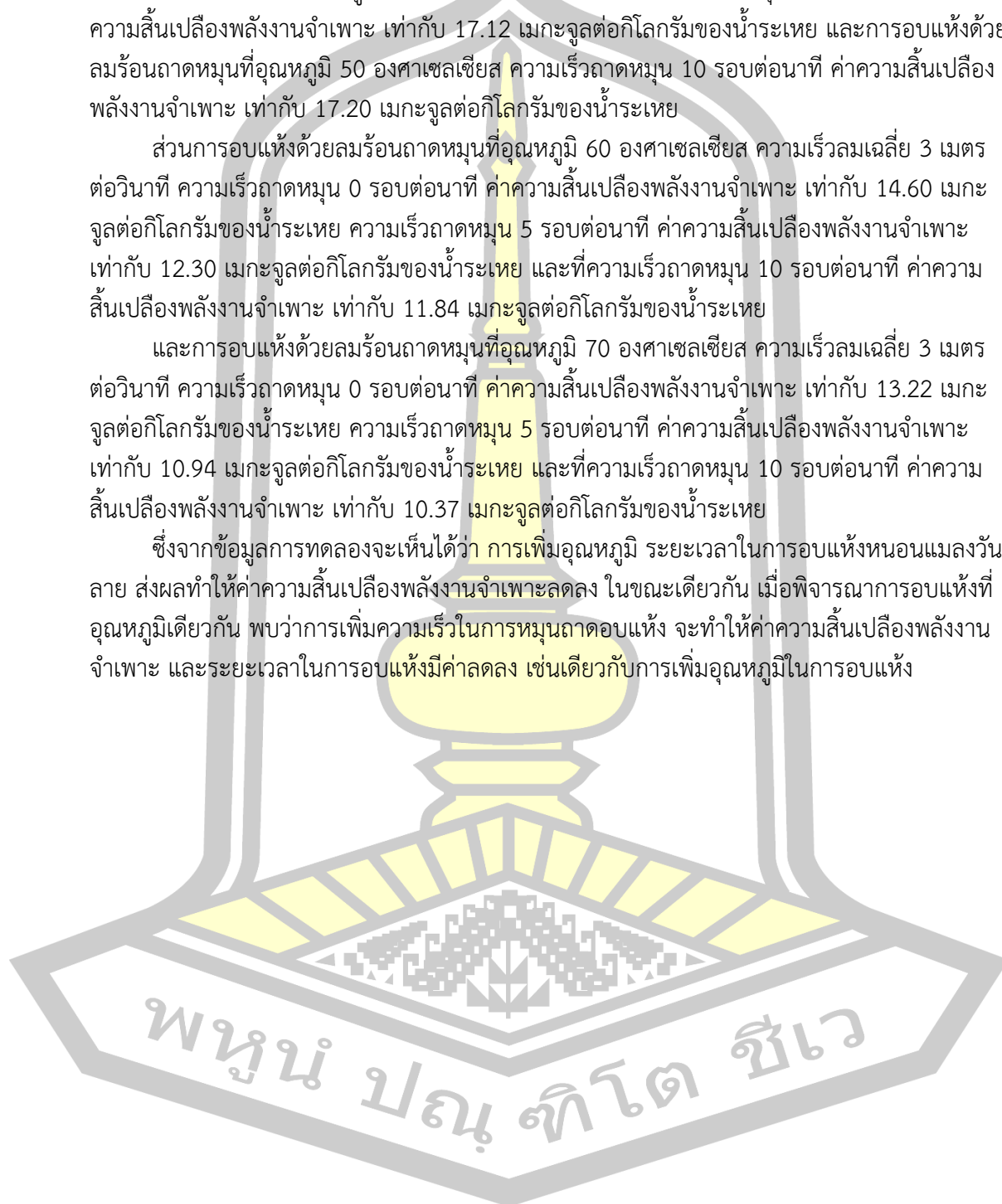
ซึ่งจากผลการทดลองความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบหนอนแมลงวันลายพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนถาดหมุนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยมีความเร็วลมที่เฉลี่ย 3 เมตร/วินาที มีค่าอยู่ในช่วง 10.37-18.36 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

โดยสำหรับข้อมูลผลการทดลองการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที ความเร็วพัดหมุน 0 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 18.36 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย ที่ความเร็วพัดหมุน 5 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 17.12 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย และการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วพัดหมุน 10 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 17.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย

ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที ความเร็วพัดหมุน 0 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 14.60 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย ความเร็วพัดหมุน 5 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 12.30 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย และที่ความเร็วพัดหมุน 10 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 11.84 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย

และการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที ความเร็วพัดหมุน 0 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 13.22 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย ความเร็วพัดหมุน 5 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 10.94 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย และที่ความเร็วพัดหมุน 10 รอบต่อนาที ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 10.37 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย

ซึ่งจากข้อมูลการทดลองจะเห็นได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบแห้งนอนแมลงวันลาย ส่งผลทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการเพิ่มความเร็วในการหมุนพัดอบแห้ง จะทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และระยะเวลาในการอบแห้งมีค่าลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง



ตารางที่ 23 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะการอบแห้งของเมล็ดวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

Drying condition		Drying time (hr)	$E_p(\text{kw}\cdot\text{h})$				Water Evaporated (kg)	Specific Energy Consumption, SEC ($\text{MJ/kg}_{\text{water evaporated}}$)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Rotating (rpm)		Blower	Heater	Rotation	total		
50	0	31	4.724	0.520	0.000	20.838	4.085	18.36
	5	29.5	4.496	0.468	1.338	19.642	4.131	17.12
	10	28	4.267	0.516	0.825	19.544	4.090	17.20
60	0	18.5	2.819	0.790	0.000	17.443	4.299	14.60
	5	13	1.981	0.932	0.590	14.691	4.299	12.30
	10	11	1.676	1.041	0.324	13.451	4.089	11.84
70	0	9	1.372	1.500	0.000	14.875	4.050	13.22
	5	7	1.067	1.560	0.317	12.303	4.050	10.94
	10	7	1.067	1.485	0.206	11.670	4.050	10.37

4.8 การทดสอบอาหารแต่ละประเภทในการเลี้ยงจิ้งหรีด

โดยผู้วิจัยได้มีการศึกษาการผสมหนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ และการทดสอบการกินอาหารแต่ละประเภทของจิ้งหรีดโดยมีการบดอาหารแต่ละชนิดก่อนนำไปทดลอง (หนอนแมลงวันลาย กากถั่วเหลือง ข้าวโพด ข้าวสาลี และมันหมักยีสต์)

4.8.1 การศึกษาส่วนผสมอาหาร และปริมาณสารอาหาร ในการเลี้ยงจิ้งหรีด

ปริมาณสารอาหารที่จำเป็นของวัตถุดิบเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหารจิ้งหรีด เน้นที่ปริมาณโปรตีนตั้งแต่ 8% ถึง 45% และปริมาณไขมันตั้งแต่ 0.86% ถึง 26.6% แสดงดังตารางที่ 24 ซึ่งการผสมอาหารควรมีปริมาณโปรตีน 21% เทียบเท่ากับอาหารจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ โดยปริมาณโปรตีนที่สูงขึ้นจะส่งเสริมให้การเจริญเติบโตของจิ้งหรีด เนื่องจากมีจิ้งหรีดมีช่วงชีวิตสั้นและต้องการปริมาณโปรตีนที่เพียงพอ อย่างไรก็ตามปริมาณโปรตีน 15% ก็เพียงพอสำหรับการส่งเสริมการเจริญเติบโตของจิ้งหรีด ดังนั้นวัตถุดิบเหล่านี้จึงมีขายในท้องถิ่น และการรวมไว้ในสูตรอาหารสามารถให้สารอาหารที่จำเป็นสำหรับจิ้งหรีดได้

ตารางที่ 24 ปริมาณสารอาหารที่จำเป็นสำหรับวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	ส่วนประกอบหลักสารอาหาร (%)		
	โปรตีน	ไขมัน	แคลเซียม
ผงหนอนแมลงวันลาย	45	6.6	6
ถั่วเหลืองบด	42.37	0.86	0.22
ข้าวโพดบด	8.04	6.05	-
ข้าวสาลีบด	8.05	4	0.03
อาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์	21	-	-
มันหมักยีสต์	10.9	4.5	-

4.8.2 การทดสอบอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดในท้องถิ่นทั้ง 5 ชนิด (หนอนแมลงวันลาย กากถั่วเหลือง ข้าวโพด ข้าวสาลี และมันหมักยีสต์)

จากการศึกษาและการอ้างอิงสารอาหารและโภชนาการ แสดงดังตารางที่ 24 ในการทดสอบอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดในท้องถิ่นทั้ง 5 ชนิด จัดวัตถุดิบแต่ละชนิดใส่ในภาชนะอาหารจิ้งหรีดถาดละ 50 กรัม จากนั้นนำภาชนะอาหารวางลงไปบนบ่อเลี้ยง ใช้ระยะเวลาในการทดสอบอาหาร 120 นาที จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักอาหารที่เหลือและบันทึกข้อมูล จากการทดสอบพบว่า ปริมาณคงเหลือเฉลี่ยของหนอนแมลงวันผง,อาหารเชิงพาณิชย์, ถั่วเหลืองบด,และข้าวโพดบด มีค่าเท่ากับ 2%, 9%, 13.46% และ 15.90% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 25 ซึ่งวัตถุดิบคงเหลือในปริมาณน้อยบ่งบอกถึง

ความชอบของจังหวัดในการบริโภคสิ่งเหล่านี้ ในทางกลับกันเปอร์เซ็นต์ข้าวบดคงเหลือสูงถึง 61.41% ที่ตกค้างในภาชนะเลี้ยง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าจังหวัดมีความชอบและการกินน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามการบริโภคข้าวเป็นส่วนผสมที่หาได้ง่ายและคุ้มค่าสำหรับสูตรอาหารอาจจำเป็นต้องใช้งาน นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การกินของมันเป็นค่าเฉลี่ยของจังหวัดยังคงเหลือสูงถึง 76.71% ซึ่งแสดงถึงจังหวัดไม่มีความชอบในการกินมันเป็นค่าเฉลี่ย เนื่องจากมันคุณสมบัติของมันสำหรับค่าเฉลี่ย มี ความนิยมและเนื้อสัมผัสเป็นรูปทรง มีเส้นใยสูง และขาดกลิ่นที่ไม่น่าดึงดูด ดังนั้นจึงไม่รวมส่วนผสมนี้ในสูตรอาหารลดต้นทุนเพื่อป้องกันอาหารไม่ให้กลายเป็นของเสียตกค้างในภาชนะ

ตารางที่ 25 ข้อมูลส่วนผสมอาหารที่เหลือจากการให้อาหารจังหวัด

ลำดับที่	วัตถุดิบ	เปอร์เซ็นต์ส่วนประสมที่เหลือ (%)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
1	ผงหนอนแมลงวันลาย	4.00	0.00	2.00
2	อาหารเลี้ยงจังหวัดเชิงพาณิชย์	14.00	4.00	9.00
3	ถั่วเหลืองบด	23.08	3.85	13.46
4	ข้าวโพดบด	22.00	9.80	15.90
5	ข้าวสารบด	79.69	43.14	61.41
6	มันหมักยีสต์	82.00	71.43	76.71

4.8.3 การทดสอบการผสมหนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์

การนำหนอนแมลงวันลายผงมาใช้เป็นส่วนผสมกับอาหารเลี้ยงจังหวัดเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเป็นอาหารสัตว์ทดแทนปลาป่นอย่างแพร่หลาย ซึ่งได้รับการยอมรับและส่งเสริมจากบริการเกษตรต่างประเทศในกรุงวอชิงตัน ดี.ซี. ตัวอ่อนของแมลงวันลายได้กลายมาเป็นแหล่งอาหารทางเลือกเพื่อลดต้นทุนการเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีโปรตีนถึง 42% ไขมัน 35% 2,900 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อะมิโนกรดและสารอาหารอื่นๆ ตัวอ่อนได้ค่อนข้างมากกรดไขมันอิ่มตัว (SFA) ในระดับต่ำในช่วงที่ยังไม่เจริญเต็มที่ระยะ ปริมาณโปรตีนของตัวอ่อนเทียบได้กับปริมาณโปรตีนที่พบในเนื้อหมูโดยประมาณ 43.2% นอกจากนี้ต้องใช้ตัวอ่อนของแมลงวันลายพื้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแหล่งโปรตีนอื่นๆ โดยมีอัตราส่วน 1-2 ล้านปอนด์ต่อเฮคเตอร์ เพื่อประเมินผลรวมของหนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารเชิงพาณิชย์ จึงได้มีการทดลองให้อาหารกับจังหวัดอายุ 2-3 สัปดาห์ ก่อนทำการเก็บเกี่ยว 15 วัน โดยใช้น้ำหนักเริ่มต้นของจังหวัดอยู่ที่ 500 กรัมต่อบ่อ แสดงดังตารางที่ 26 ซึ่งจากการทดลองให้อาหารพบว่า เมื่อใช้อาหารเลี้ยงจังหวัดเชิงพาณิชย์ อัตราการเปลี่ยนอาหาร

เป็นน้ำหนักสูงสุด (FCR) คือ 15.26 กรัม ซึ่งหมายถึง ปริมาณอาหาร 15.26 กรัมต่อการเพิ่มน้ำหนัก จิ้งหรีด 1 กรัม ในการเปรียบเทียบ เมื่อผสมหนอนแมลงวันลายที่ 25% และ 50% อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) เท่ากับ 3.66 และ 2.25 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อผสมหนอนแมลงวันลายที่ 75% ของอาหาร ผลผลิตสุดท้ายมีปริมาณลดลง ทำให้ยากต่อการทำประเมินอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) จากรายงานถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวนี้ก็ยังตาม อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนัก (FCR) ของแมลงที่กินได้ของจิ้งหรีดบ้าน (*Acheta domesticus*) ได้รับการแสดงว่ามี FCR 0.9 - 1.1 ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร และล่าสุดอีกงานมีการให้ค่า FCR 1.9-2.4 สาเหตุที่มีส่วนทำให้ FCR ที่ต่ำ อาจเกิดจากสภาวะร่างกายของแมลงที่ขาดอาหาร หรือการควบคุมอุณหภูมิภายใน (แมลงเป็น poikilothermic) ส่วนประสิทธิภาพการใช้อาหาร (ECI) มีค่าสูงสุด 44.38% เมื่อผสมหนอนแมลงวันลายที่ 50% ร่วมกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า 100 กรัมของอาหารจิ้งหรีดที่บริโภคมีปริมาณมวลอาหารที่ใช้งานได้สูงถึง 44.38 กรัม เมื่อเปรียบเทียบอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ทั่วไป ที่ให้น้ำมวลอาหารมาใช้ได้เพียง 6.55 กรัม จาก 100 กรัมอาหารที่บริโภค จึงแสดงให้เห็นได้ว่าการใช้หนอนแมลงวันลายผสมในสูตรอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ช่วยให้จิ้งหรีดใช้อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเป็นกล้ามเนื้อหรือน้ำหนักได้ดี เมื่อได้รับการผสมหนอนแมลงวันลายที่ 25-50% ในตัวส่วนผสมอาหาร ซึ่งดีกว่าการพึ่งพาเพียงอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์อย่างเดียว อย่างไรก็ตาม ควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติม คือ ในส่วนกำหนดอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมที่สุดและสำรวจการรวมส่วนผสมอื่นๆ ไว้ในสูตรอาหาร

ตารางที่ 26 ข้อมูลการทดลองการผสมผงหนอนแมลงวันลาย (BSF) กับอัตราส่วนอาหารเลี้ยงจิ้งหรีด สำเร็จรูปเชิงพาณิชย์สำหรับจิ้งหรีด 500 กรัมต่อการทดลอง

อัตราส่วนผสม หนอนแมลงวันลาย	การให้ อาหาร(กรัม)	น้ำหนัก เริ่มต้น จิ้งหรีด (กรัม)	น้ำหนักสุดท้าย จิ้งหรีด(กรัม)	ผลต่าง ของ น้ำหนัก จิ้งหรีด	FCR	ECI (%)
0	992	500	565	65	15.26	6.55
25	1121	500	806	306	3.66	27.29
50	1068	500	974	474	2.25	44.38
75	889	500	461	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่มีข้อมูล เนื่องจาก น้ำหนักสุดท้ายของจิ้งหรีด < น้ำหนักเริ่มต้น
จิ้งหรีด

4.8.4 การศึกษาสูตรอัตราส่วนการผสมอาหารในการเลี้ยงจิ้งหรีด

จากตารางที่ 8 สูตรอัตราส่วนส่วนผสมสำหรับการให้อาหารจิ้งหรีดที่คุ้มค่าโดยอิงจากสมการ Pearson's Square ส่วนผสมอาหารสำหรับการให้อาหารจิ้งหรีด โดยจะคำนวณเป็นสัดส่วน 100 กิโลกรัม ที่มีการพิจารณาการรวมทรัพยากรในท้องถิ่น โดยเฉพาะปริมาณหนอนแมลงวันลายซึ่งสามารถเพาะเลี้ยงเองได้และมีปริมาณโปรตีนสูงเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ นอกจากนี้ปริมาณของอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ที่มีขายทั่วไปยังคงอยู่ในสูตรอาหารลดต้นทุน ซึ่งทำให้มีสูตรอาหารที่แตกต่างกัน 3 สูตร โดยมีปริมาณตัวอ่อนแมลงวันทหารดำ 15.80%, 20.61%, และ 22.63% ตามลำดับ และเป็นอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ที่มีขายทั่วไป 10.87%, 17.86% และ 0% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์ (สูตรที่ 4) ในปัจจุบันจำหน่ายตามท้องตลาดในราคาขายปลีกถุงละ 630 บาท (30 กิโลกรัมต่อถุง) ณ เดือนมีนาคม 2566 นอกจากนี้เมื่อเติมวัตถุดิบอื่นๆ ปริมาณความชื้นของสูตร 1, สูตร 2 และสูตร 3 คือ 10.14%, 8.25%, 8.18% และ 7.41% แบบเปียก (w.b.) ตามลำดับ ซึ่งก็ต่ำกว่า 14% w.b. ทำให้มั่นใจได้ถึงการจับเก็บที่ปลอดภัยโดยไม่เน่าเสียหรือการปนเปื้อนของเชื้อรา และมีเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนสำหรับสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 คือ 36.58%, 33.25% และ 40.71% ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 อัตราส่วนส่วนผสม สูตรการให้อาหารจิ้งหรีด

สัดส่วนอาหาร	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4
ผงหนอนแมลงวันลาย	15.80	20.61	22.63	-
ถั่วเหลืองบด	19.98	14.56	15.99	-
ข้าวโพดบด	31.61	29.12	31.97	-
ข้าวสารบด	21.74	17.86	29.41	-
อาหารเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์	10.87	17.86	-	100.00
น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	100.00	100.00	100.00	100.00
ราคาต่อหน่วย (30 kg)	399.53*	420.51*	373.50 *	630 *
เปอร์เซ็นต์การลดต้นทุน (%)	36.58	33.25	40.71	-
ความชื้น (%)	10.14	8.25	8.18	7.41

หมายเหตุ *การคำนวณค่าอาหารเปรียบเทียบ ณ เดือนมีนาคม 2566

4.8.5 การทดสอบการให้อาหารจิ้งหรีดด้วยสูตรที่แตกต่างกัน

การทดสอบการให้อาหารจิ้งหรีดตามสูตร 1 ถึงสูตร 4 ทำการทดสอบกับจิ้งหรีดที่กำลังเติบโตซึ่งกินอาหารปริมาณมากจนกระทั่งเก็บเกี่ยว จิ้งหรีดโตเต็มวัยได้รับการสังเกตและบันทึกไว้ ดังตารางที่ 28 ภายในบ่อเลี้ยงขนาดประมาณ 1 ตารางเมตรต่อตัวอย่าง ขนาดของจิ้งหรีดแตกต่างกันไปตามระยะการพัฒาที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้ตัวอย่างที่แตกต่างกัน ในตารางที่ 28 เลือกจิ้งหรีดเมื่ออายุประมาณ 21-25 วัน (ระยะก่อนโตเต็มวัย) เป็นตัวอย่างและป้อนในภาชนะแยกกัน โดยแต่ละตัวอย่างมีน้ำหนัก 900 กรัม ระยะเวลาการให้อาหารกินเวลา 11 วันจนกระทั่งจิ้งหรีดพร้อมสำหรับการเก็บเกี่ยว โดยให้จิ้งหรีดมีการเจริญเติบโตแบบธรรมชาติจนมีขนาดตัวเต็มวัย และมีการให้อาหารเพียงพอสำหรับแต่ละวัน เพื่อตอบสนองความต้องการการบริโภคในแต่ละวัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้อาหาร จิ้งหรีดจะถูกชั่งน้ำหนักพร้อมกับอาหารที่สะสมในแต่ละสูตร ผลการวิจัยพบว่าสูตรที่ 2 ให้ผลผลิตจิ้งหรีด 99.89% ของน้ำหนักเริ่มต้น เมื่อเทียบกับการให้อาหารด้วยอาหารเชิงพาณิชย์ (สูตร 4) ซึ่งให้ผลผลิตจิ้งหรีด 99.56% ของน้ำหนักเริ่มต้น ในทางกลับกัน สูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 ให้ผลผลิตลดลงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 96.11% และ 95.89% ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ ปริมาณอาหารโดยประมาณที่ให้ไว้สำหรับสูตรอาหาร 2 และ 3 ซึ่งให้น้ำหนักใกล้เคียงกันคือ 1,408 กรัม ในขณะที่สูตร 2 และสูตร 3 ให้ปริมาณอาหารใกล้เคียงกันที่ 1,295.5 และ 1,306.5 กรัม ตามลำดับ

จากการทดลองแสดงให้เห็นการลดลงของผลผลิตจิ้งหรีดสำหรับทุกตัวอย่าง ซึ่งบ่งชี้ถึงปัจจัยที่เป็นไปได้ เช่น การใช้จิ้งหรีดที่ยังไม่เจริญเต็มที่ หรือความหนาแน่นของฝูงในบ่อเลี้ยงสูง จึงมีการทดสอบรอบที่สอง โดยข้อมูลแสดงไว้ดังตารางที่ 29 ซึ่งใช้จิ้งหรีดตัวเต็มวัย เพื่อทดสอบสูตรอาหารต่างๆ โดยน้ำหนักมีการลดลงเหลือ 500 กรัมต่อตัวอย่าง และมีระยะเวลาการให้อาหารเป็น 7 วัน (28 มีนาคม ถึง 3 เมษายน 2023) จากนั้นจึงประเมินน้ำหนักของจิ้งหรีด

ผลการทดลองพบว่าการให้อาหารสูตรที่ 2 ให้ผลผลิต 91.0% ของน้ำหนักเริ่มต้น โดยมีปริมาณอาหาร 303.5 กรัม การให้อาหารตามสูตร 4 (อาหารเชิงพาณิชย์) และสูตร 1 สูตร 3 ให้ผลตอบแทน 87.53%, 88.07% และ 85.40% ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ ดังนั้น จากผลผลิตสุดท้ายของจิ้งหรีดทั้งสองระยะที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหารต่างๆ สรุปได้ว่าสูตรที่ 2 เป็นสูตรที่เหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโภชนาการและคุณภาพของจิ้งหรีดที่ได้รับเพิ่มเติม เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารให้อาหารด้วยอาหารจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 28 การให้อาหารจิ้งหรีดระยะกลางปริมาณ 900 กรัมต่อบ่อจนเก็บเกี่ยวโดยใช้สูตรต่างกัน

สูตรอาหาร	ปริมาณการให้อาหาร(กรัม)	น้ำหนักเริ่มต้นจิ้งหรีด(กรัม)	น้ำหนักสุดท้ายจิ้งหรีด(กรัม)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตจิ้งหรีด (%)
				ปริมาณอาหาร	น้ำหนักเริ่มต้นจิ้งหรีด	น้ำหนักสุดท้ายจิ้งหรีด	
1	1265	900	937	1235.5		865	96.11
	1206	900	793				
2	1322	900	952	1295.5		899	99.89
	1269	900	846				
3	1311	900	878	1306.5		863	95.89
	1302	900	848				
4	1398	900	875	1408		896	99.56
	1418	900	917				

ตารางที่ 29 การให้อาหารจิ้งหรีดตัวเต็มวัยปริมาณ 500 กรัมต่อบ่อจนเก็บเกี่ยวโดยใช้สูตรต่างกัน

สูตรอาหาร	ปริมาณการให้อาหาร(กรัม)	น้ำหนักเริ่มต้นจิ้งหรีด(กรัม)	น้ำหนักสุดท้ายจิ้งหรีด(กรัม)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตจิ้งหรีด (%)
				ปริมาณอาหาร	น้ำหนักเริ่มต้นจิ้งหรีด	น้ำหนักสุดท้ายจิ้งหรีด	
1	277	500	438	309		440.33	88.07
	332	500	484				
	318	500	399				
2	307	500	477	303.5		455	91.00
	259	500	455				
	300	500	433				
3	274	500	411	258.67		427	85.40
	292	500	484				
	210	500	386				
4	258	500	435	263.67		437.67	87.53
	242	500	429				
	291	500	449				

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยลมร้อนแบบภาตหมุน

5.1.1 การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาตหมุน

จากการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิลมร้อนเมื่อมีการเพิ่มความเร็วลมจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิลมร้อนในห้องอบแห้ง สามารถกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้เฉพาะฮีตเตอร์ในการทำงานเพียงอย่างเดียว

5.1.2 การศึกษาปัจจัยการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาตหมุน

ในการศึกษาปัจจัยการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาตหมุน โดยทำการศึกษาปัจจัยความเร็วลม (3 และ 6 เมตรต่อวินาที) ปัจจัยความเร็วรอบการหมุน ภาตอบแห้ง (0.5 และ 10 รอบต่อนาที) และความหนาในการอบแห้ง (5, 10 และ 20 มิลลิเมตร) พบว่า ในการศึกษาปัจจัยความเร็วเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที กับ ความเร็วลมเฉลี่ย 6 เมตรต่อวินาที อัตราการลดลงของความชื้น ไม่มีความแตกต่างกัน แต่จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่า โดยที่ความเร็วลมเฉลี่ย 6 เมตรต่อวินาที จะสูญเสียพลังงานไฟฟ้ามากกว่าความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที อยู่ที่ 3.92 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ส่วนการศึกษาปัจจัยความเร็วรอบการหมุนภาตอบแห้งที่ความเร็วรอบภาตหมุน 10 รอบต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเฉลี่ย 6 เมตรต่อวินาที และมีการใช้หนอนแมลงวันลายความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 63.3 % w.b. พบว่า อัตราการลดลงของความชื้นของหนอนแมลงวันลาย สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง ได้มากกว่าความเร็วรอบภาตหมุน 0 รอบต่อนาที (ไม่หมุน) โดยสามารถลดระยะเวลาในการอบ ได้ถึง 4.5 ชั่วโมง

และในส่วนปัจจัยความหนาในการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย พบว่า ที่ความหนา 5 มิลลิเมตร จะมีอัตราการลดลงของความชื้นที่สูง เนื่องจากปริมาณพลังงานความร้อนมีการแลกเปลี่ยนกับตัวของผลิตภัณฑ์ ได้ง่าย จึงทำให้ ระยะเวลาในการอบแห้งมีช่วงเวลาที่สั้น และเหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบาง

5.1.3 การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ ภาดหมุน

ในการศึกษา พฤติกรรมการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย โดยมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 64.2 - 67.1 %w.b. โดยนำหนอนแมลงวันลายอบแห้ง ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบภาดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที โดยใช้ความเร็วลมเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วรอบการหมุนภาดเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้อัตราการลดลงของความชื้นเพิ่มสูงขึ้น การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนกับผลิตภัณฑ์ง่ายขึ้น และทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง

5.1.4 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งการอบแห้งหนอนแมลงวันลาย ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน

การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยกระบวนการอบแห้งแบบภาดหมุน โดยใช้แบบจำลองเอมพิริคัลจำนวน 8 สมการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนความชื้น (MR) จึงได้ทำการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design โดยจะได้ทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง โดยมีปัจจัยการอบแห้ง 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที การทดลอง 3 ซ้ำ พบว่าแบบจำลองการอบแห้งที่นำมาศึกษามีค่า สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) อยู่ในช่วง 0.9200-1.000 โดยจากการวิเคราะห์หาแบบจำลองเหมาะสมที่สุด พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 0 รอบต่อนาที แบบจำลองของ Page จะให้ผลทำนายที่ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ

ส่วนการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 5 10 รอบต่อนาที และ อุณหภูมิ 60 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที พบว่าแบบจำลองของ Logarithmic จะให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 มากกว่า ในขณะที่ χ^2 และ RMSE น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ

5.1.5 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff})

จากการทดลองการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลขึ้นอยู่กับปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วรอบภาดหมุน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุนมีค่าอยู่ในช่วง 2.533×10^{-9} ถึง 1.039×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที โดยสำหรับการอบแห้งหนอนแมลงวันลายที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 10 รอบต่อนาที จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงที่สุด เท่ากับ 1.039×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที

5.1.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน

จากการทดลองการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ในการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดหมุน ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 0 5 และ 10 รอบต่อนาที พบว่า ปริมาณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและความเร็วรอบในการหมุน ภาด โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วรอบในการหมุนภาดที่เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง ซึ่งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ต่ำที่สุดในการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบภาดหมุน 10 รอบต่อนาที โดยมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับ 10.37 เมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำระเหย

5.2 สรุปผลการทดลองการใช้อาหารลดต้นทุนในการเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์

5.2.1 การทดสอบอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดท้องถื่น 5 ชนิด

จากการทดสอบอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดในท้องถื่น 5 ชนิด ได้แก่ หนอนแมลงวันผง กากถั่วเหลืองบด ข้าวโพดบด ข้าวสารบด และมันหมักยีสต์บด โดยทำการเปรียบเทียบกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดสำเร็จรูป พบว่า ปริมาณคงเหลือเฉลี่ยของหนอนแมลงวันผง,อาหารเชิงพาณิชย์, ถั่วเหลืองบด,และข้าวโพดบด มีค่าเท่ากับ 2%, 9%, 13.46% และ 15.90% ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความชอบของอาหารของจิ้งหรีด ในส่วนของข้าวสารบดและมันหมักยีสต์จะมีปริมาณคงเหลือจากการทดสอบการกินอาหารสูงถึง 61.41% และ 76.71% ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงจิ้งหรีดไม่มีความชอบในการกินมันสำปะหลังหมักยีสต์ เนื่องจากมันคุณสมบัติของมันสำปะหลังหมักยีสต์ มีความนิ่มและเนื้อสัมผัสเป็นรูพรุน มีเส้นใยสูง และขาดกลิ่นที่ไม่น่าดึงดูด ดังนั้นจึงไม่นำมาใช้ในส่วนผสมสูตรอาหารลดต้นทุนเพื่อป้องกันอาหารไม่ให้กลายเป็นของเสียตกค้างในภาชนะ แต่อย่างไรก็ตามการบริโภคข้าวสารบดเป็นส่วนผสมที่หาได้ง่ายและคุ้มค่าสำหรับสูตรอาหารอาจจำเป็นต้องใช้งาน จึงยังมีการเลือกนำมาใช้ในส่วนผสมอาหารลดต้นทุน

5.2.2 การทดสอบการผสมหนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดสำเร็จรูป

จากผลการทดลอง สำหรับการประเมินผล จะใช้จิ้งหรีดอายุ 2-3 สัปดาห์ น้ำหนัก 500 กรัมต่อบ่อทดลอง ก่อนทำการเก็บเกี่ยวผลผลิต 15 วัน และในการใช้หนอนแมลงวันลายร่วมกับอาหารเลี้ยงจิ้งหรีดสำเร็จรูป จะมีการผสมสูตรอาหารทั้งหมด 4 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 ผสมหนอนแมลงวันลาย 0% สูตรที่ 2 ผสมหนอนแมลงวันลาย 25% สูตรที่ 3 ผสมหนอนแมลงวันลาย 50% และสูตรที่ 4 หนอนแมลงวันลาย ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อใช้อาหารเลี้ยงจิ้งหรีดสำเร็จรูป ในการเลี้ยง จะมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักอยู่ที่ 15.26 กรัมต่อน้ำหนักจิ้งหรีด 1 กรัม เมื่อทำการ

เปรียบเทียบกับการผสมหอนแมลงวันลายที่ 25% และ 50% ว่า พบว่า อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็น น้ำหนัก (FCR) มีค่าเท่ากับ 3.66 และ 2.25 ตามลำดับ ส่วน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (ECI) มีค่าสูงสุด 44.38% เมื่อผสมหอนแมลงวันลายที่ 50% ร่วมกับอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เชิงพาณิชย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า 100 กรัมของอาหารจุลินทรีย์ที่บริโภคมีปริมาณมวลอาหารที่ใช้งานได้สูงถึง 44.38 กรัม เมื่อเปรียบเทียบอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เชิงพาณิชย์ทั่วไป ที่ให้น้ำมวลอาหารมาใช้ได้เพียง 6.55 กรัม จาก 100 กรัมอาหารที่บริโภค จึงแสดงให้เห็นได้ว่าการใช้หอนแมลงวันลายผสมในสูตรอาหารเลี้ยง จุลินทรีย์เชิงพาณิชย์ช่วยให้จุลินทรีย์ใช้อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ เนื่องจากสามารถ เปลี่ยนเป็นกล้ามเนื้อหรือน้ำหนักได้ดี เมื่อได้รับการผสมหอนแมลงวันลายที่ 25-50% ในตัว ส่วนผสมอาหาร ซึ่งดีกว่าการพึ่งพาเพียงอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เชิงพาณิชย์อย่างเดียว

5.2.3 การทดสอบการให้อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ลดต้นทุนด้วยสูตรที่แตกต่างกัน

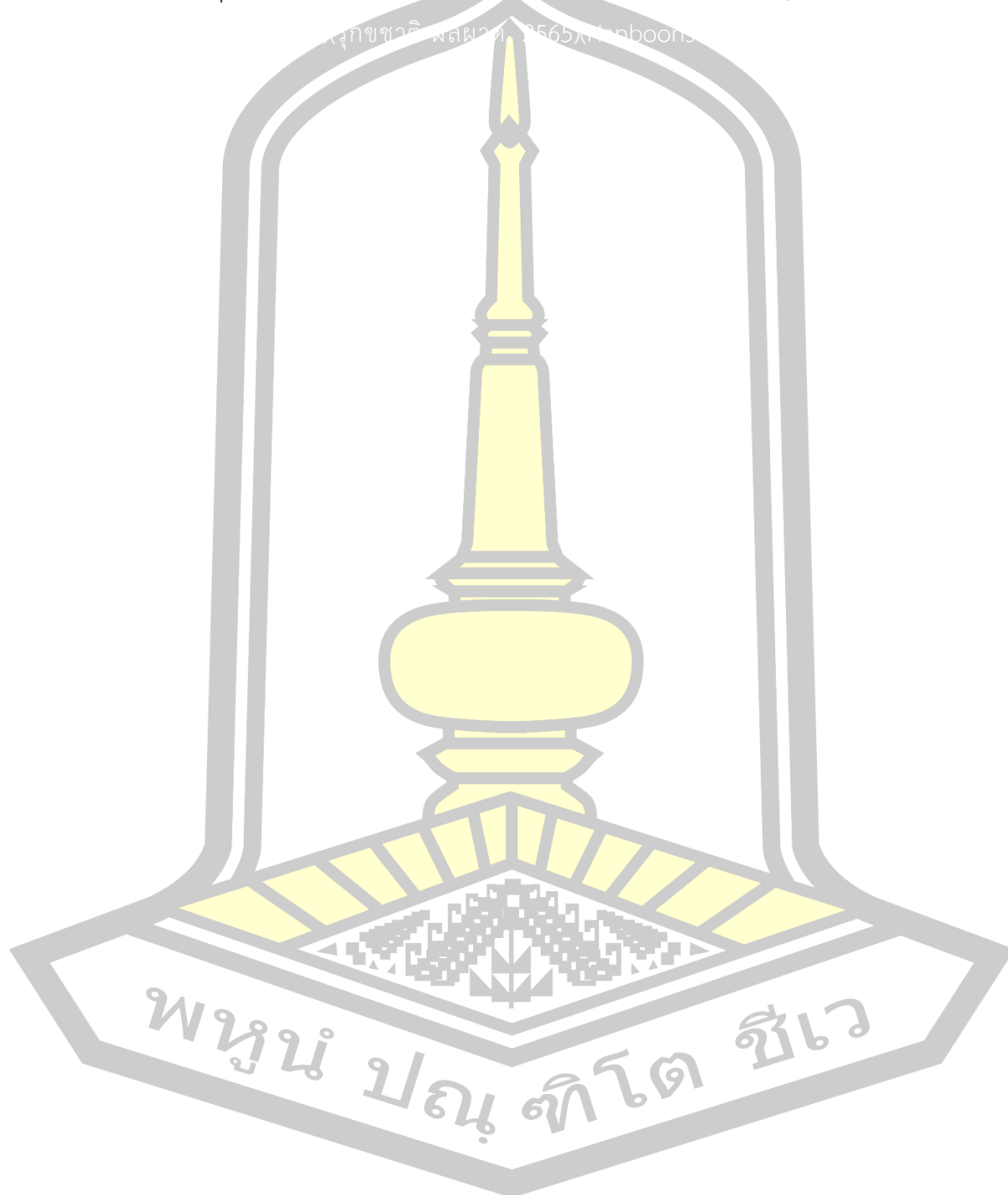
การทดสอบการผสมสูตรอัตราส่วนอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ลดต้นทุนทั้งหมด 3 สูตร เปรียบเทียบกับอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์สำเร็จรูป โดยใช้จุลินทรีย์ในการทดลองอายุประมาณ 21-25 วัน (ระยะก่อนโตเต็มวัย) ภายในบ่อเลี้ยงขนาด 1 ตารางเมตรต่อตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างมีน้ำหนัก 900 กรัม พบว่า สูตรที่ 2 ให้ผลผลิตจุลินทรีย์ 99.89% ของน้ำหนักเริ่มต้น เมื่อเทียบกับการให้อาหาร ด้วยอาหารเชิงพาณิชย์ (สูตร 4) ซึ่งให้ผลผลิตจุลินทรีย์ 99.56% ของน้ำหนักเริ่มต้น ในทางกลับกัน สูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 ให้ผลผลิตลดลงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 96.11% และ 95.89% ของ น้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการทดลองดังกล่าวมีการลดลงของผลผลิตของจุลินทรีย์ทุก ตัวอย่าง จึงมีการทดสอบรอบที่ 2 โดยจะใช้จุลินทรีย์ตัวเต็มวัย และใช้จุลินทรีย์ลดลงเหลือ 500 กรัม ซึ่ง จากผลการทดลองพบว่า การให้อาหารสูตรที่ 2 ให้ผลผลิต 91.0% ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามด้วยสูตรที่ 4 (อาหารเชิงพาณิชย์) สูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 ให้ผลผลิตจุลินทรีย์อยู่ที่ 87.53%, 88.07% และ 85.40% ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าสูตรที่ 2 เป็นสูตรที่เหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์หา องค์ประกอบทางโภชนาการและคุณภาพของจุลินทรีย์ที่ได้รับเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบกับอาหาร จุลินทรีย์เชิงพาณิชย์ต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1.งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการอบแห้งหอนแมลงวันลาย โดยอาศัยการเปลี่ยนพลังงาน ไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน จึงควรมีการศึกษาพลังงานทางเลือกอื่นๆ ที่มีต้นทุนด้านพลังงานที่ถูก กว่า มาใช้ในกระบวนการอบแห้งหอนแมลงวันลายเพื่อลดต้นทุนในการอบแห้ง

- 2.อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ลดต้นทุน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่สามารถต่อยอดและพัฒนาให้ มีคุณภาพต่อไปในอนาคต เพื่อเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกร และภาคอุตสาหกรรมการเลี้ยงจุลินทรีย์

3. ในการอบแห้งหมอนแมลงด้วยด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ไม่ได้ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และสูตรอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ลดต้นทุนในแต่ละสูตร จึงควรมีการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ในด้านคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และอื่นๆ ต่อไป



บรรณานุกรม

- กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2565). สถานการณ์แมลง : จิ้งหรีด. Retrieved from http://www.agriman.doae.go.th/homebee0/insect_situation/98-99Cricket.pdf
- กรัณย์ คำมูล. (2556). การปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ความต้องการโภชนาของสัตว์. (2561). Retrieved from <http://202.29.239.235/catnews/attachfile/xL02072018.pdf>
- จักรพัทร มาลามณีรัตน์ และคณะ. (2563). การใช้ผงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากเต้าหู้ในอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต องค์ประกอบซาก และคุณภาพเนื้อ(Use of black soldier fly larvae (BSFL) fed with soy waste powder in broiler diet on growth performance, carcass) composition and meat quality. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 5, 942–953. Retrieved from <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj/article/view/251907/172293>
- ชญาณิศ รัตนมงคล. (2561). จลนพลศาสตร์การอบแห้งมะม่วงด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดไกล (มหาวิทยาลัยแม่โจ้). Retrieved from <http://ir.mju.ac.th/dspace/bitstream/123456789/72/1/5903307003.pdf>
- ชมภู ยิ้มโต. (2550). การถนอมอาหาร(Food preservation) (2nd ed.). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ณัฐพล กระจำจ. (2560). การอบแห้งขมิ้นชัน ด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด (มหาวิทยาลัยบูรพา). Retrieved from <https://buuir.buu.ac.th/bitstream/1234567890/6241/1/Fulltext.pdf>
- ณัฐเสกสรรค์ สร้อยทองดี. (2562). ต้นทุนและผลตอบแทนในการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์:กรณีศึกษาภาค กลางของประเทศไทย.
- ทัศนีย์ แจ่มจรรยา,และชาญชัย ถาวรอนุกุลกิจ. (2548). การเพาะ เลี้ยงจิ้งหรีดเพื่อเป็นอาหารของมนุษย์. 428–432. ตำบลคลองไผ่ อำเภอสี่คิ้ว, นครราชสีมา.
- ทัศนีย์ แจ่มจรรยา. (2555). ความยั่งยืนของธุรกิจแมลงกินได้. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 3, 203–206. Retrieved from <https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=00->

Tasane.pdf&id=806&keeptrack=9

ธิดาภรณ์ จันทน์สม. (2563). ผลของอาหารที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโต อัตราการสืบพันธุ์ และ ปริมาณโปรตีนของจิ้งหรีดทองดำ(*Gryllus bimaculatus de geer*) (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์). Retrieved from <https://www.scribd.com/document/607692093/จ-งหรีด>

นพวรรณ ชมชัย. (2542). การคำนวณสูตรอาหารอย่างง่ายสำหรับสัตว์เล็กและสัตว์ปีก (1st ed.). Retrieved from https://pvlo-cmi.dld.go.th/webnew/images/doc/create_awareness/2563/02/01.pdf

บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. (2543). หลักโภชนศาสตร์สัตว์ เอกสารการสอนชุดวิชาหลักโภชนศาสตร์และ อาหารสัตว์. นนทบุรี: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

ประทุมพร คำภาสุข,และ เยาวรัตน์ ศรีวรรณนท์. (2557). การจัดการการผลิต และการตลาด ของฟาร์ม จิ้งหรีด ในเขตพื้นที่ จังหวัดขอนแก่น กาฬสินธุ์ และมหาสารคาม. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 4, 547–554. Retrieved from <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj/article/view/250574/171397>

พิบูลย์ สีคำ. (2564). การออกแบบและทดสอบระบบอบแห้งแบบผสมผสานเพื่อการประหยัดพลังงาน (มหาวิทยาลัยแม่โจ้). Retrieved from <http://ir.mju.ac.th/dspace/bitstream/123456789/811/1/6115301025.pdf>

พิสุทธิ เอกอำนวยการ. (2556). การเลี้ยงจิ้งหรีด: โลกของตักแตน จิ้งหรีด 1. เชียงใหม่: ม.ป.พ.

เมธา สินธุโครต. (2566). การอบแห้งแบบถึงหม่นร่วมกับไมโครเวฟสำหรับการเตรียมลูกเห็ดเห็ดเห็ดเร็ว (มหาวิทยาลัยมหาสารคาม). Retrieved from <http://202.28.34.124/dspace/handle/123456789/1904>

รุกขชาติ ผลผาด. (2565). การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (มหาวิทยาลัยมหาสารคาม). Retrieved from <http://202.28.34.124/dspace/bitstream/123456789/1440/1/62010382007.pdf>

วัชรพร เลื่อมใส และสุนทร นาดี. (2564). คู่มือการเลี้ยงจิ้งหรีด ฉบับประชาชน. Retrieved from <https://region6.dld.go.th/webnew/images/Z016.pdf>

วิโรจน์ ภัทรจินดา. (2555). โภชนศาสตร์สัตว์เลี้ยงและสัตว์ป่า. ขอนแก่น: ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วีไล รังสาดทอง. (2546). *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร* (3rd ed.). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ศราวุธ รัตนวงษ์, วีรชัย แผ่นอุไร, พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์, แอ. ด. (2565). การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแบบถึงทรงกระบอกหมุน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, 10(1), 125–142. Retrieved from <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/246539/168471>

ศุภชัย อุดชาชน, วรรณภา อ่างทอง, พิสมัย วงศ์พาณิชย์, อ. ช. (2558). ผลของการใช้กากมันสำปะหลังหมักยีสต์ทดแทนอาหารชั้นในสูตรอาหารโคขุนพันธุ์กบินทร์บุรีต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตและลักษณะซาก. *แก่นเกษตร*. Retrieved from https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=O008Ani_061.pdf&id=1812&keeptrack=4

สมควร โพธารินทร์ และคณะ. (2563). *คู่มือองค์ความรู้การส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพเกษตรกรด้วยนวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม*. Retrieved from <https://www3.rdi.ku.ac.th/wp-content/uploads/2021/11/คู่มือองค์ความรู้-อ.สมควร-Posted.pdf>

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท* (พิมพ์ครั้งที่...). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สรารุณ ดาแก้ว และคณะ. (2560). *การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดและลมร้อน* (มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม). Retrieved from <http://research.rmu.ac.th/rdi-mis//upload/fullreport/1632634340.pdf>

สักรกมล เทพหัสดิน ณ อยุธยา. (2555). *การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ (Drying of foods and Biomaterials)*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.

สำนักงานพัฒนาอาหาร. (2559). ถั่วเหลืองแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์. Retrieved from <https://nutrition.dld.go.th/nutrition/index.php/2017-09-26-01-39-06/348-2016-05-07-03-18-56>

สำนักงานพัฒนาอาหาร. (2560). วัตถุดิบอาหารสัตว์(รำข้าว). Retrieved from <https://nutrition.dld.go.th/nutrition/index.php/the-joomla-project/953-2017-09-01-05-06-54>

สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. (2566). ข้าว อาหารสัตว์. Retrieved from

<https://nutrition.dld.go.th/nutrition/index.php/using-joomla/326-2021-09-03-02-38-29/2752-2023-06-13-03-10-08>

สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, รัตนา ทาปา, แ. ว. (2555). แมลงกินได้ ทางเลือกในภาวะเกิดภัยพิบัติ. *วารสารราชบัณฑิตยสถาน*, 1, 125–139. Retrieved from http://legacy.orst.go.th/royin2014/upload/246/FileUpload/2829_5204.pdf

สุกฤตา อนุตระกูลชัย, สมสมร แก้วบริสุทธ, แ. ห. (2557). การลดต้นทุนและเพิ่มมูลค่าการเลี้ยงจิ้งหรีดบ้าน (Cost reduction and value adding for farmed house crickets). *Khon Kaen Agriculture Journal*, 3, 329–336. Retrieved from <https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=08 Sukritta.pdf&id=1714&keeptrack=7>

สุภาวดี แหยมคง, ประภาศิริ ใจผ่อง, จักรกฤษ ศรีระออ, ปุณณดา ทะรังศรี, วิไลลักษณ์ เก่าทุม, ปรัชญา พงษ์เขียว, นนทวัฒน์ บางเอี่ยม, และทศพร อินเจริญ. (2566). ผลของโปรแกรมการให้อาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของจิ้งหรีดทองแดงลาย. *Khon Kaen Agriculture Journal SUPPL.*, 595–599. Retrieved from https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=51-Ent06_P.pdf&id=4866&keeptrack=2

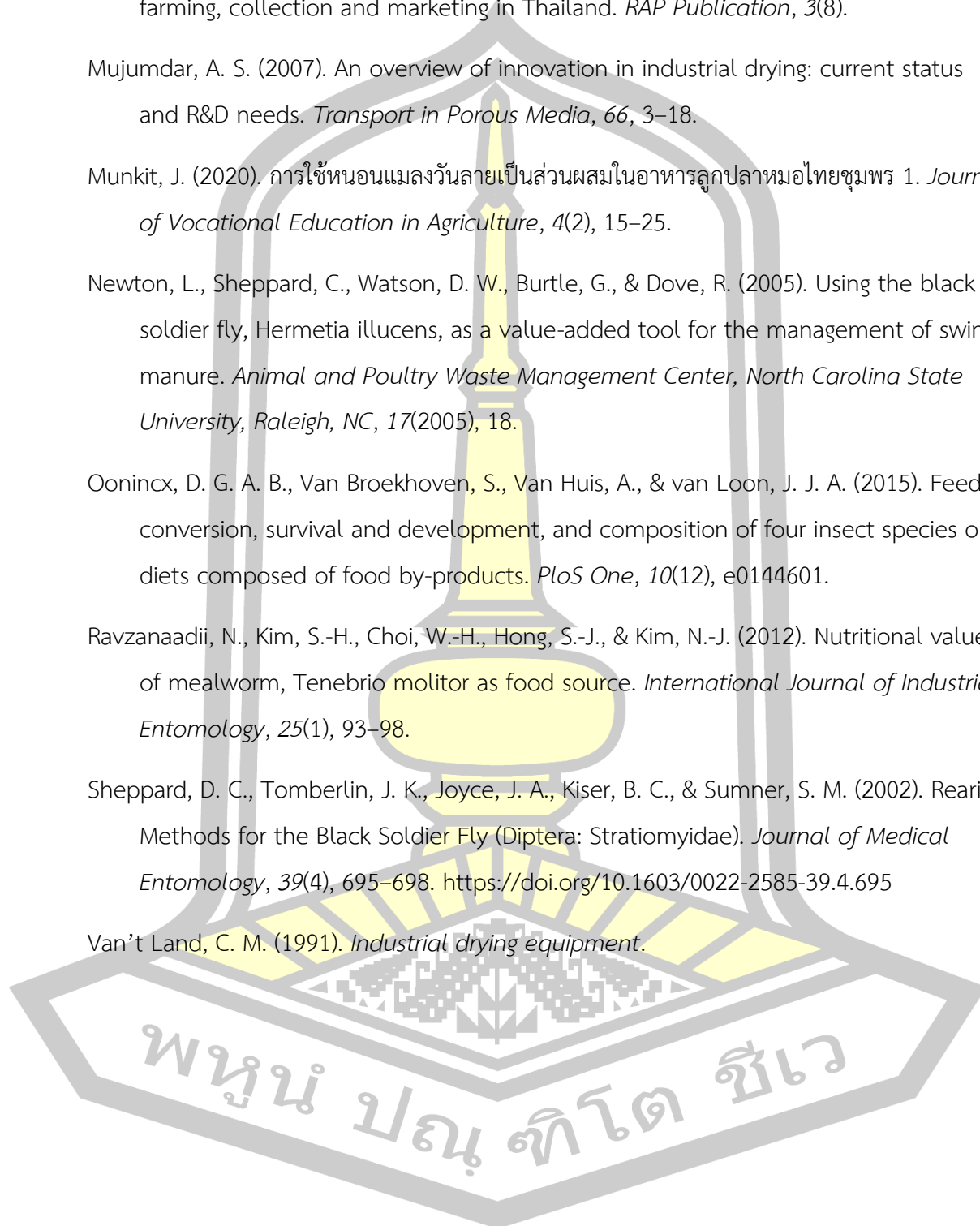
อินทัย วิงสระน้อย, สุกัญญา สายธิ, และ พรประภา ชุนถนอม. (2556). ชนิดอาหารต่อการเจริญเติบโตระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกำจัดเศษอาหารในระบบทางเดินอาหารของจิ้งหรีดและการยอมรับของผู้บริโภค (Kind of diet on the growth, reasonable period for food waste elimination in digestive system of cricket and consumer acceptance). *Khon Kaen Agriculture Journal*, 3, 275–284. Retrieved from <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj/article/view/251485/172011>

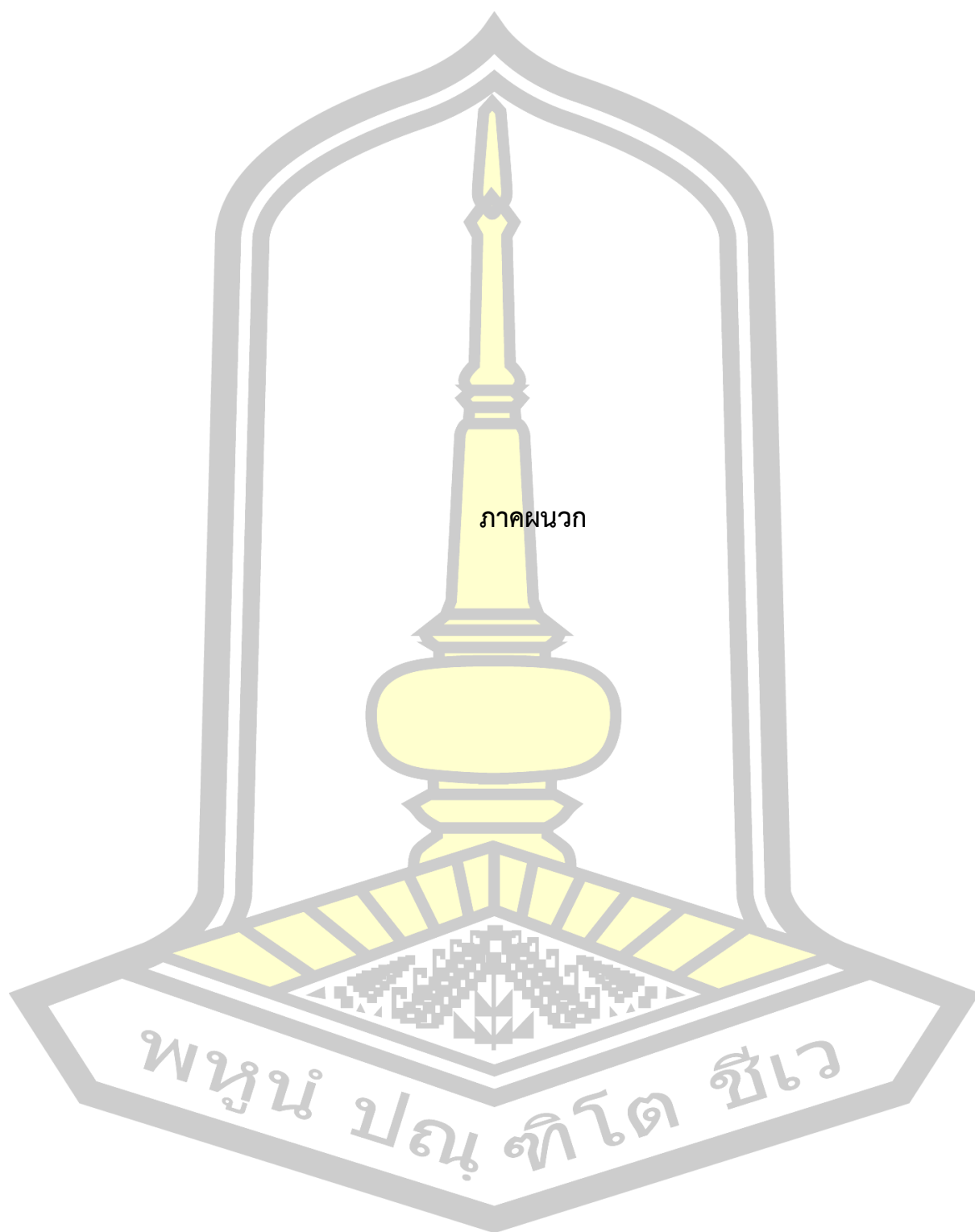
อารีย์ สมานมิตร. (2545). จิ้งหรีด จิ้งโกร่ง - อีกผลิตภัณฑ์หนึ่ง. *อาหาร*, 32, 3–5. Retrieved from https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/BKN_FRPD/search_detail/result/29558

อุทัย คั่นโธ. (2529). *อาหารและการผลิตอาหารเลี้ยงสุกรและสัตว์ปีก*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน คณะเกษตร กำแพงแสน ภาควิชาสัตวบาล ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมการเลี้ยงสุกรแห่งชาติ. นครปฐม.

Ghosh, S., Lee, S.-M., Jung, C., & Meyer-Rochow, V. B. (2017). Nutritional composition of five commercial edible insects in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(2), 686–694.

- Hanboonsong, Y., Jamjanya, T., & Durst, P. B. (2013). Six-legged livestock: edible insect farming, collection and marketing in Thailand. *RAP Publication*, 3(8).
- Mujumdar, A. S. (2007). An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. *Transport in Porous Media*, 66, 3–18.
- Munkit, J. (2020). การใช้หนอนแมลงวันลายเป็นส่วนผสมในอาหารลูกปลาหมอไทยชุมพร 1. *Journal of Vocational Education in Agriculture*, 4(2), 15–25.
- Newton, L., Sheppard, C., Watson, D. W., Burtle, G., & Dove, R. (2005). Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. *Animal and Poultry Waste Management Center, North Carolina State University, Raleigh, NC*, 17(2005), 18.
- Oonincx, D. G. A. B., Van Broekhoven, S., Van Huis, A., & van Loon, J. J. A. (2015). Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. *PloS One*, 10(12), e0144601.
- Ravzanaadii, N., Kim, S.-H., Choi, W.-H., Hong, S.-J., & Kim, N.-J. (2012). Nutritional value of mealworm, *Tenebrio molitor* as food source. *International Journal of Industrial Entomology*, 25(1), 93–98.
- Sheppard, D. C., Tomberlin, J. K., Joyce, J. A., Kiser, B. C., & Sumner, S. M. (2002). Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Medical Entomology*, 39(4), 695–698. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-39.4.695>
- Van't Land, C. M. (1991). *Industrial drying equipment*.





ภาคผนวก

พูน ปณ จิต ชีเว



ตารางผนวกที่ ก1 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	65.25	188.47	1.00000
30	64.15	179.66	0.95327
60	63.14	172.03	0.91276
90	62.37	166.44	0.88312
120	61.82	162.63	0.86289
150	61.37	159.52	0.84642
180	60.91	156.48	0.83030
210	60.39	153.16	0.81264
240	59.85	149.73	0.79444
270	59.28	146.24	0.77593
300	58.75	143.05	0.75902
330	58.16	139.62	0.74082
360	57.59	136.47	0.72410
390	56.88	132.50	0.70301
420	56.22	128.99	0.68442
450	55.54	125.52	0.66599
480	54.87	122.16	0.64819
510	54.14	118.61	0.62933
540	53.34	114.83	0.60929
570	52.66	111.74	0.59289
600	51.83	108.10	0.57356
630	51.01	104.61	0.55504
660	50.23	101.37	0.53786
690	49.33	97.79	0.51888
720	48.47	94.49	0.50136
750	47.52	90.95	0.48255
780	46.55	87.49	0.46424
810	45.83	85.01	0.45107
840	45.02	82.29	0.43664
870	44.23	79.68	0.42279
900	43.40	77.07	0.40891

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 รอบต่อนาที (ต่อ)

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
930	42.58	74.52	0.39538
960	41.68	71.83	0.38111
990	40.86	69.40	0.36821
1020	39.84	66.56	0.35315
1050	38.87	63.90	0.33905
1080	37.98	61.56	0.32662
1110	36.73	58.33	0.30949
1140	35.66	55.69	0.29551
1170	34.71	53.45	0.28360
1200	33.44	50.49	0.26788
1230	32.30	47.92	0.25427
1260	31.14	45.42	0.24100
1290	29.79	42.60	0.22604
1320	28.60	40.19	0.21327
1350	27.23	37.56	0.19927
1380	25.97	35.21	0.18685
1410	24.75	32.98	0.17501
1440	23.67	31.10	0.16503
1470	22.43	28.99	0.15383
1500	21.10	26.80	0.14219
1530	19.91	24.92	0.13221
1560	18.65	22.96	0.12183
1590	17.62	21.42	0.11366
1620	16.66	20.02	0.10621
1650	15.62	18.53	0.09834
1680	14.62	17.14	0.09095
1710	14.04	16.36	0.08679
1740	13.40	15.50	0.08224
1770	11.94	13.57	0.07203
1800	11.07	12.45	0.06607
1830	10.54	11.79	0.06255
1860	10.01	11.13	0.05903

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	64.44	181.25	1.0000
30	63.07	170.84	0.9425
60	62.22	164.75	0.9090
90	61.75	161.45	0.8907
120	61.14	157.36	0.8682
150	60.62	153.99	0.8496
180	60.07	150.45	0.8301
210	59.50	146.97	0.8109
240	58.89	143.26	0.7904
270	58.24	139.51	0.7697
300	57.63	136.02	0.7505
330	56.90	132.06	0.7286
360	56.12	127.93	0.7058
390	55.49	124.68	0.6879
420	54.78	121.17	0.6685
450	54.19	118.31	0.6527
480	53.31	114.19	0.6300
510	52.52	110.60	0.6102
540	51.75	107.28	0.5919
570	50.74	103.02	0.5684
600	49.86	99.43	0.5486
630	48.95	95.89	0.5291
660	47.99	92.27	0.5090
690	47.08	88.98	0.4909
720	46.13	85.62	0.4724
750	45.34	82.96	0.4577
780	44.63	80.59	0.4447
810	43.61	77.35	0.4267
840	42.87	75.05	0.4141
870	41.61	71.25	0.3931
900	40.48	68.01	0.3752

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที (ต่อ)

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
930	39.29	64.71	0.3570
960	38.26	61.98	0.3420
990	37.13	59.07	0.3259
1020	35.92	56.07	0.3094
1050	34.63	52.99	0.2924
1080	33.32	49.98	0.2758
1110	31.95	46.94	0.2590
1140	30.38	43.65	0.2408
1170	28.81	40.47	0.2233
1200	27.46	37.86	0.2089
1230	26.00	35.13	0.1938
1260	24.81	33.00	0.1821
1290	23.56	30.83	0.1701
1320	22.14	28.44	0.1569
1350	20.87	26.37	0.1455
1380	19.51	24.24	0.1337
1410	18.43	22.59	0.1246
1440	17.24	20.83	0.1149
1470	15.96	19.00	0.1048
1500	14.69	17.22	0.0950
1530	13.42	15.50	0.0855
1560	12.46	14.24	0.0785
1590	11.77	13.34	0.0736
1620	10.97	12.32	0.0680
1650	10.02	11.14	0.0615
1680	9.16	10.09	0.0557
1710	8.33	9.09	0.0502
1740	7.57	8.20	0.0452

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	64.29	180.05	1.0000
30	63.12	171.16	0.9506
60	62.16	164.28	0.9124
90	61.45	159.41	0.8854
120	60.91	155.83	0.8655
150	60.32	152.01	0.8443
180	59.79	148.74	0.8261
210	59.08	144.39	0.8020
240	58.41	140.43	0.7800
270	57.77	136.78	0.7597
300	57.04	132.76	0.7374
330	56.31	128.89	0.7158
360	55.59	125.18	0.6953
390	54.77	121.09	0.6726
420	53.99	117.36	0.6518
450	53.18	113.58	0.6309
480	52.37	109.96	0.6107
510	51.49	106.13	0.5895
540	50.61	102.48	0.5692
570	49.71	98.85	0.5490
600	48.80	95.30	0.5293
630	47.93	92.05	0.5112
660	46.86	88.20	0.4899
690	45.81	84.56	0.4697
720	44.69	80.82	0.4489
750	43.66	77.50	0.4304
780	42.53	74.03	0.4112
810	41.34	70.50	0.3916
840	40.25	67.37	0.3742
870	39.13	64.32	0.3572
900	38.01	61.35	0.3408

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที (ต่อ)

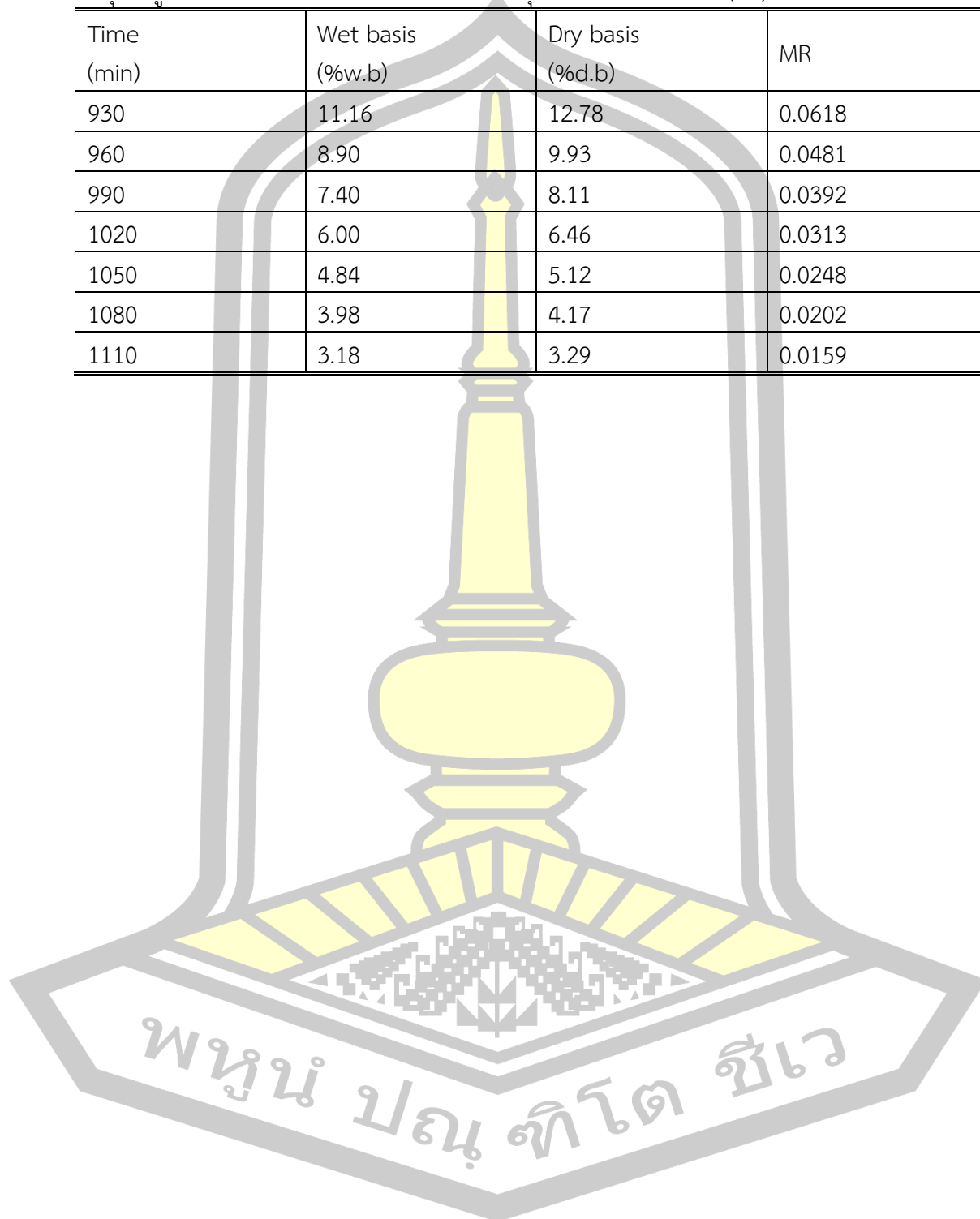
Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
930	36.79	58.25	0.3235
960	35.61	55.34	0.3074
990	34.41	52.50	0.2916
1020	32.96	49.21	0.2733
1050	31.83	46.74	0.2596
1080	30.42	43.77	0.2431
1110	28.97	40.85	0.2269
1140	27.63	38.24	0.2124
1170	26.08	35.34	0.1963
1200	24.70	32.85	0.1825
1230	23.34	30.49	0.1694
1260	22.10	28.42	0.1578
1290	20.85	26.38	0.1465
1320	19.70	24.56	0.1364
1350	18.20	22.28	0.1237
1380	16.68	20.04	0.1113
1410	15.39	18.21	0.1012
1440	14.19	16.55	0.0919
1470	13.13	15.12	0.0840
1500	12.28	14.01	0.0778
1530	11.56	13.07	0.0726
1560	10.81	12.12	0.0673
1590	10.28	11.46	0.0637
1620	9.75	10.80	0.0600
1650	9.30	10.25	0.0569
1680	8.68	9.51	0.0528

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	67.39	206.68	1.0000
30	66.18	195.73	0.9470
60	64.80	184.10	0.8908
90	63.86	176.67	0.8548
120	62.92	169.66	0.8209
150	61.97	162.93	0.7883
180	60.97	156.23	0.7559
210	59.86	149.16	0.7217
240	58.71	142.23	0.6882
270	57.61	135.97	0.6579
300	56.32	128.98	0.6241
330	55.02	122.38	0.5921
360	53.54	115.33	0.5580
390	52.19	109.28	0.5288
420	50.56	102.42	0.4956
450	48.76	95.35	0.4614
480	47.01	88.98	0.4305
510	44.98	82.05	0.3970
540	42.83	75.23	0.3640
570	40.63	68.83	0.3330
600	38.41	62.79	0.3038
630	35.80	56.21	0.2720
660	33.34	50.49	0.2443
690	30.47	44.32	0.2144
720	27.76	38.92	0.1883
750	24.83	33.56	0.1624
780	22.13	28.88	0.1398
810	19.45	24.60	0.1190
840	17.11	21.03	0.1017
870	14.90	17.85	0.0864
900	12.81	14.98	0.0725

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 รอบต่อนาที (ต่อ)

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
930	11.16	12.78	0.0618
960	8.90	9.93	0.0481
990	7.40	8.11	0.0392
1020	6.00	6.46	0.0313
1050	4.84	5.12	0.0248
1080	3.98	4.17	0.0202
1110	3.18	3.29	0.0159



ตารางผนวกที่ ก5 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	66.82312	208.579	1.0000
30	65.28797	195.2881	0.9363
60	63.79269	182.7065	0.8760
90	62.49069	172.8694	0.8288
120	61.188	163.6284	0.7845
150	59.7344	154.11	0.7389
180	58.09329	144.2831	0.6917
210	56.34926	134.6105	0.6454
240	54.40221	124.0641	0.5948
270	52.28155	113.9906	0.5465
300	49.88024	103.4751	0.4961
330	47.54144	94.71726	0.4541
360	44.63434	83.78028	0.4017
390	41.77149	74.7141	0.3582
420	38.7679	65.37039	0.3134
450	35.16006	56.35561	0.2702
480	31.48404	47.1558	0.2261
510	27.57127	38.88111	0.1864
540	24.39828	34.19384	0.1639
570	20.44313	27.37878	0.1313
600	16.40315	20.83099	0.0999
630	12.78329	15.88673	0.0762
660	9.514437	11.57979	0.0555
690	7.035323	8.547446	0.0410
720	4.559349	5.915993	0.0284
750	2.670663	4.065753	0.0195
780	1.114953	2.35942	0.0113

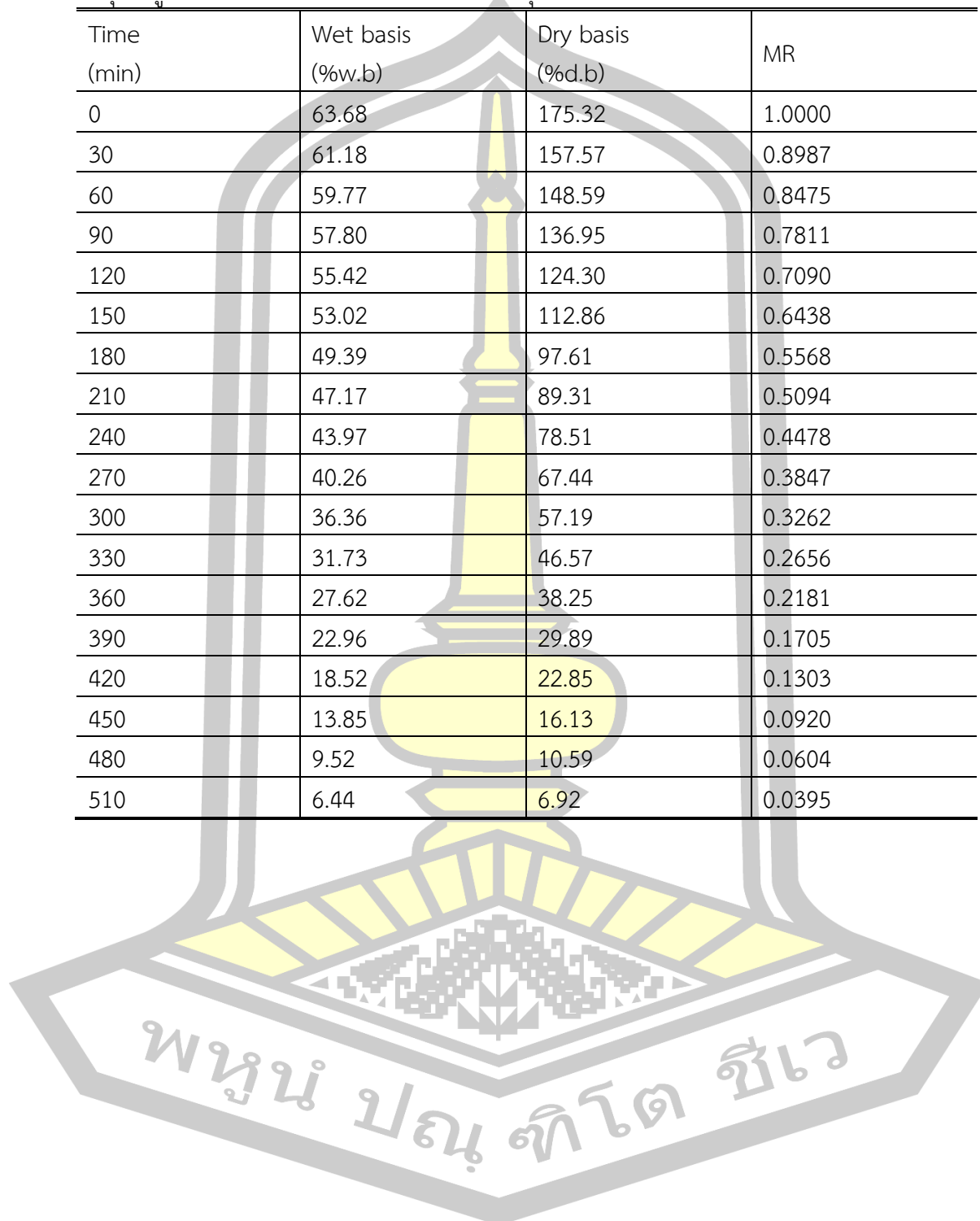
ตารางผนวกที่ ก6 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	64.29	180.05	1.0000
30	63.11	171.04	0.9500
60	61.84	162.07	0.9002
90	60.54	153.44	0.8523
120	59.52	147.01	0.8165
150	57.63	136.03	0.7555
180	55.70	125.72	0.6983
210	53.93	117.04	0.6501
240	51.85	107.67	0.5980
270	49.74	98.95	0.5496
300	47.49	90.46	0.5024
330	45.01	81.85	0.4546
360	42.34	73.43	0.4078
390	39.62	65.61	0.3644
420	36.54	57.57	0.3198
450	31.39	45.76	0.2541
480	27.13	37.24	0.2068
510	22.85	29.63	0.1646
540	18.50	22.70	0.1261
570	13.55	15.67	0.0870
600	9.40	10.38	0.0576
630	5.11	5.39	0.0299
660	2.02	2.07	0.0115

พูน ปณ ทิโต ชีเว

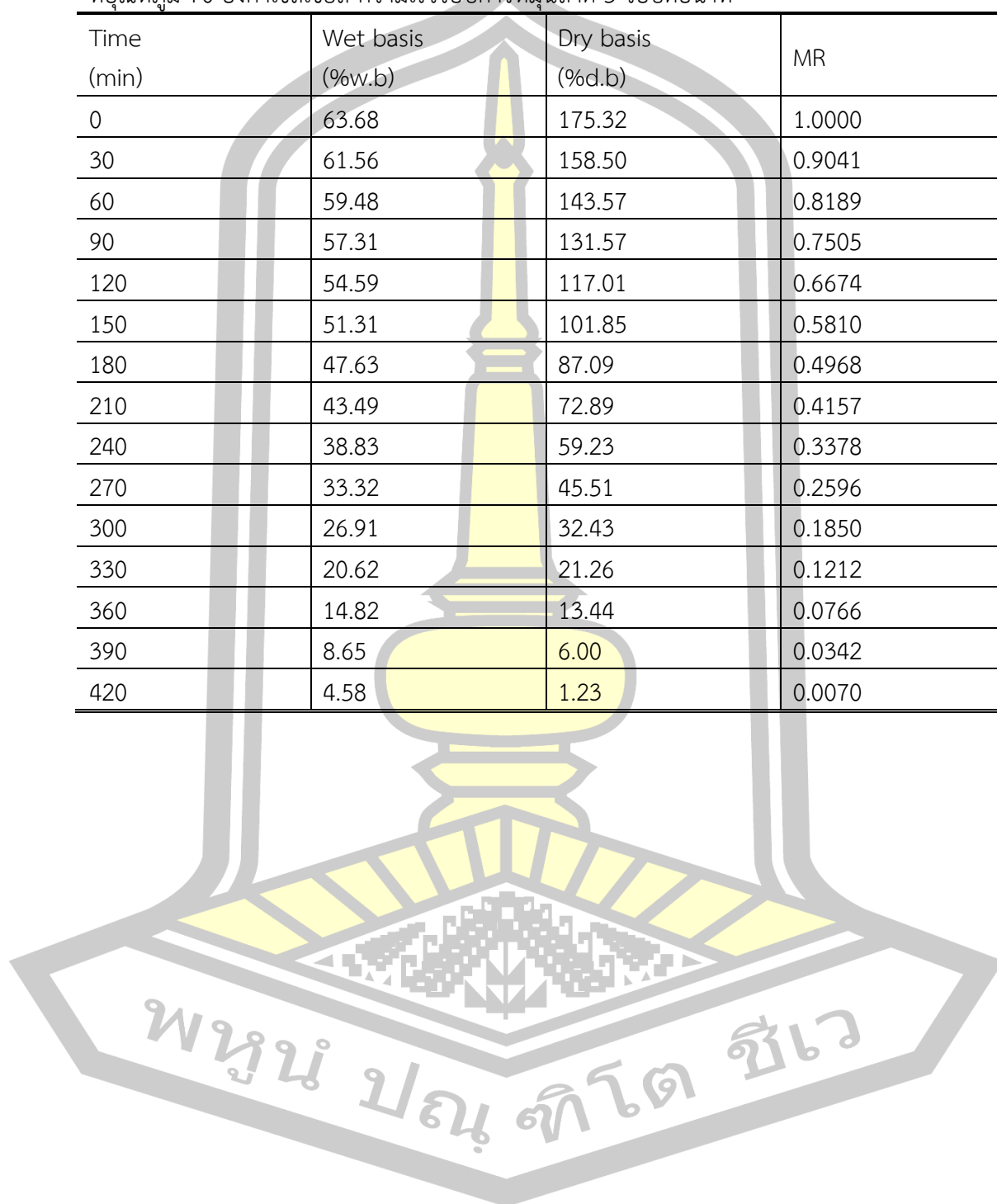
ตารางผนวกที่ ก7 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 0 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	63.68	175.32	1.0000
30	61.18	157.57	0.8987
60	59.77	148.59	0.8475
90	57.80	136.95	0.7811
120	55.42	124.30	0.7090
150	53.02	112.86	0.6438
180	49.39	97.61	0.5568
210	47.17	89.31	0.5094
240	43.97	78.51	0.4478
270	40.26	67.44	0.3847
300	36.36	57.19	0.3262
330	31.73	46.57	0.2656
360	27.62	38.25	0.2181
390	22.96	29.89	0.1705
420	18.52	22.85	0.1303
450	13.85	16.13	0.0920
480	9.52	10.59	0.0604
510	6.44	6.92	0.0395



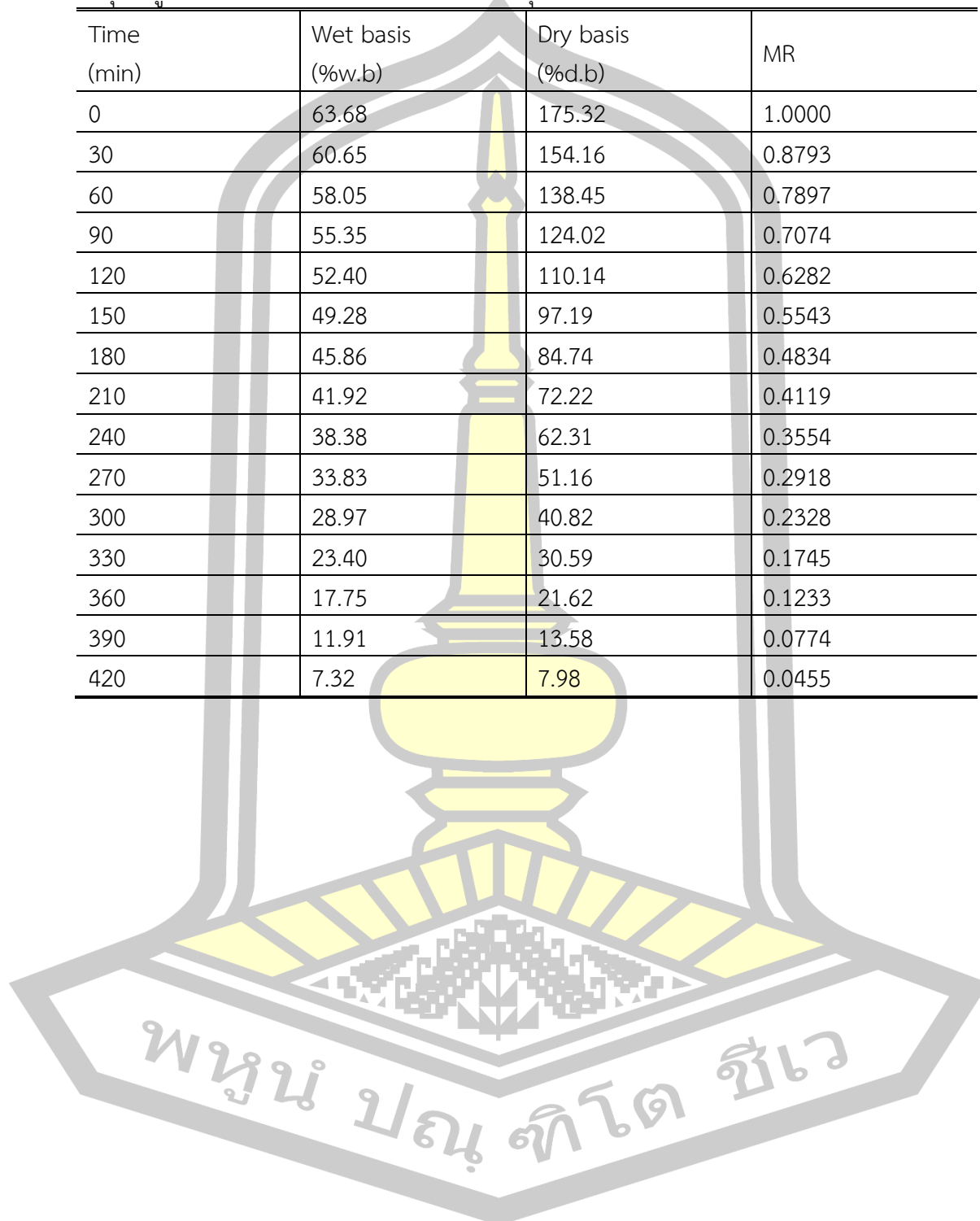
ตารางผนวกที่ ก8 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 5 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	63.68	175.32	1.0000
30	61.56	158.50	0.9041
60	59.48	143.57	0.8189
90	57.31	131.57	0.7505
120	54.59	117.01	0.6674
150	51.31	101.85	0.5810
180	47.63	87.09	0.4968
210	43.49	72.89	0.4157
240	38.83	59.23	0.3378
270	33.32	45.51	0.2596
300	26.91	32.43	0.1850
330	20.62	21.26	0.1212
360	14.82	13.44	0.0766
390	8.65	6.00	0.0342
420	4.58	1.23	0.0070



ตารางผนวกที่ ก9 ค่าเฉลี่ยผลการอบแห้งหนอนแมลงวันลายด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนถาด 10 รอบต่อนาที

Time (min)	Wet basis (%w.b)	Dry basis (%d.b)	MR
0	63.68	175.32	1.0000
30	60.65	154.16	0.8793
60	58.05	138.45	0.7897
90	55.35	124.02	0.7074
120	52.40	110.14	0.6282
150	49.28	97.19	0.5543
180	45.86	84.74	0.4834
210	41.92	72.22	0.4119
240	38.38	62.31	0.3554
270	33.83	51.16	0.2918
300	28.97	40.82	0.2328
330	23.40	30.59	0.1745
360	17.75	21.62	0.1233
390	11.91	13.58	0.0774
420	7.32	7.98	0.0455





ตารางผนวกที่ ข1 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณห์ภูมิ 50 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 0 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.0010								0.9740	0.01966	0.03995
2. Page	0.0002		1.2410						0.9900	0.00867	0.01791
3. Modified page	0.0010		1.2410						0.9900	0.03192	0.06593
4. Henderson& pabis	0.0010			1.0420					0.9770	0.06135	0.12671
5. Logarithmic	0.0010			1.5080		-			0.9990	2.42398	5.09037
6. Two term	0.0010	0.0010		0.5210	0.5210	0.5340			0.9770	0.06135	0.13101
7. verma et al	0.0010			1.2390			0.0001		0.9890	0.22305	0.46841
8. Modified Henderson&pabis	0.0010			0.4550	0.2930	0.2930	0.0010	0.001	0.9770	0.06008	0.13282

ตารางผนวกที่ ข2 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณห์ภูมิ 50 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 5 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.001								0.9670	0.07532	0.15324
2. Page	0.00015		1.316						0.9900	0.00435	0.00900
3. Modified page	0.001		1.302						0.9720	0.11556	0.23923
4. Henderson& pabis	0.001			1.056					0.9720	0.17570	0.36374
5. Logarithmic	0.0005			1.587		-0.605			0.9980	0.02794	0.05888
6. Two term	0.001	0.001		0.528	0.528				0.9720	0.17570	0.37697
7. verma et al	0.001			1.2539			0.0009		0.9980	0.05363	0.11300
8. Modified Henderson&pabis	0.001			0.463	0.269	0.269	0.001	0.001	0.9720	0.07675	0.17088

ตารางผนวกที่ ข3 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณภูมิ 50 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 10 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.001								0.9700	0.12825	0.26108
2. Page	0.0002		1.293						0.9920	0.18853	0.39077
3. Modified page	0.001		1.293						0.9920	0.18853	0.39077
4. Henderson& pabis	0.001			1.057					0.9750	0.25612	0.53087
5. Logarithmic	0.0006			1.469		-0.48			0.9980	0.00016	0.00035
6. Two term	0.002	0.002		51.198	-50.259				0.9950	0.60367	1.29845
7. verma et al	0.0007			3.549			0.0005		0.9980	0.25112	0.53015
8. Modified Henderson&pabis	0.001			0.469	0.294	0.294	0.001	0.001	0.9750	0.25612	0.57251

ตารางผนวกที่ ข4 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอุปแท้งขึ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณภูมิ 60 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 0 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.002								0.9540	0.00170	0.00349
2. Page	0.00014		1.4208						0.9895	0.00623	0.01316
3. Modified page	0.002		1.421						0.9890	0.00099	0.00208
4. Henderson& pabis	0.0022			1.0832					0.9631	0.00360	0.00759
5. Logarithmic	0.001			1.5425		0.5382			0.9960	0.00030	0.00066
6. Two term	0.002	0.002		0.541	0.542				0.9631	0.03534	0.07900
7. verma et al	0.001			9.865			0.001		0.9960	0.83342	1.80971
8. Modified Henderson&pabis	0.005			-4.523	2.732	2.732	0.004	0.004	0.9892	0.00206	0.00490

ตารางผนวกที่ ข5 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณภูมิ 60 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 5 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.0028								0.9488	0.00042	0.00088
2. Page	0.00016	1.4873							0.9917	0.00012	0.00027
3. Modified page	0.003	1.487							0.9920	0.00566	0.01223
4. Henderson& pabis	0.0031			1.09495					0.9603	0.00230	0.00498
5. Logarithmic	0.0013			1.6262		-0.6097			0.9962	0.00111	0.00250
6. Two term	0.003	0.003		0.548	0.547				0.9603	0.00727	0.01706
7. verma et al	0.00369			-2.29108			0.00345		0.9505	0.00181	0.00408
8. Modified Henderson&pabis	0.003			0.45	0.438	0.207	0.003	0.003	0.9600	0.00727	0.01869

ตารางผนวกที่ ข6 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณห์ภูมิ 60 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 10 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.0027								0.9276	0.00022	0.00046
2. Page	7.48E-05		1.6133						0.9888	0.00116	0.00254
3. Modified page	0.003		1.613						0.9890	0.00504	0.01103
4. Henderson& pabis	0.0031			1.1103					0.9450	0.00162	0.00355
5. Logarithmic	0.0005			3.4546		-2.4405			0.9987	0.01445	0.03324
6. Two term	0.0033	0.0033		0.894	0.216				0.9450	0.00078	0.00188
7. verma et al	0.0002			7.517			0.0001		0.9821	0.82641	1.90075
8. Modified Henderson&pabis	0.003			0.221	0.221	0.669	0.003	0.003	0.9240	0.00593	0.01605

ตารางผนวกที่ ข7 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณห์ภูมิ 70 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 0 รอบต่อนาที

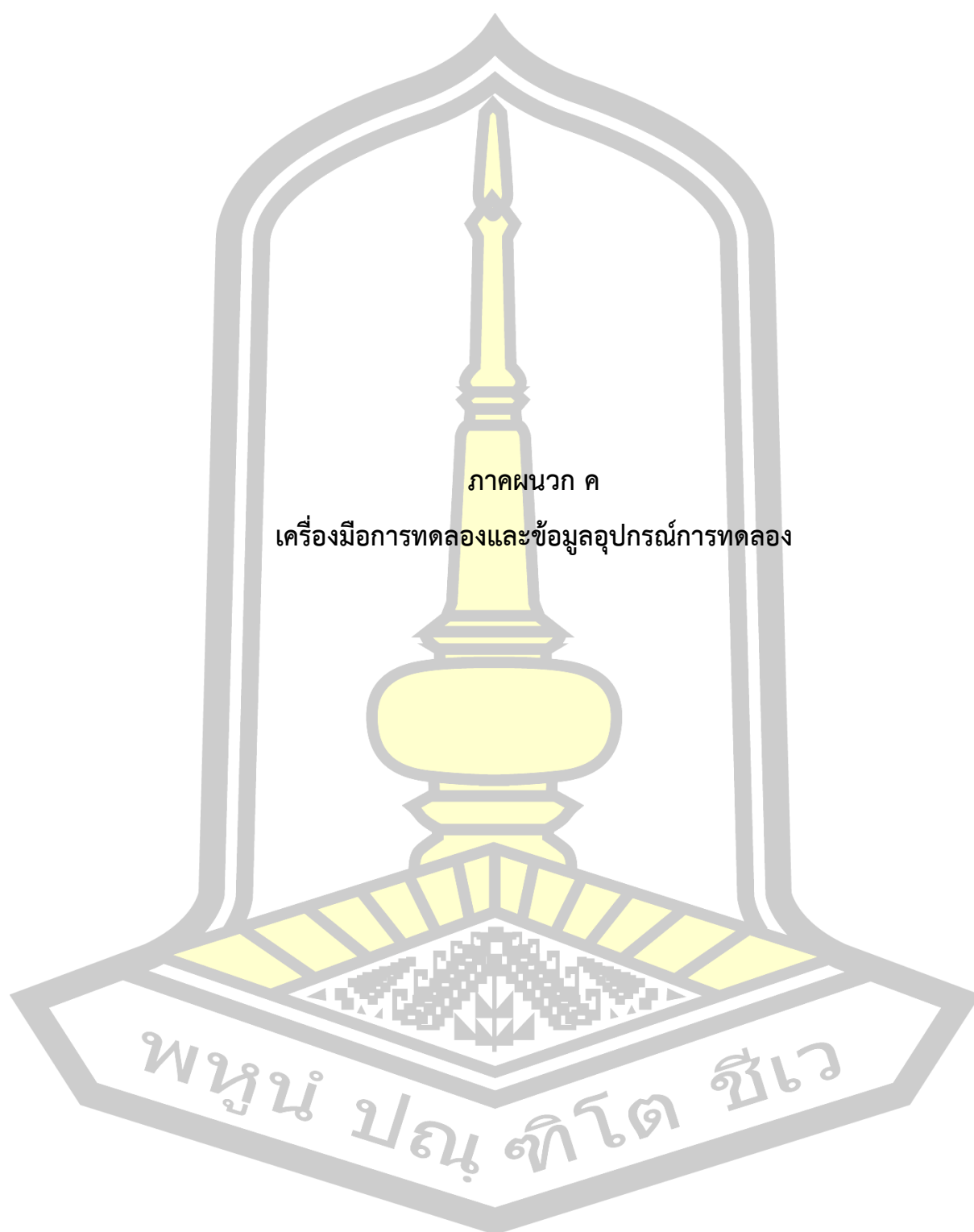
Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.0038								0.9582	0.00000	0.00000
2. Page	0.000376		1.4133						0.9926	0.00060	0.00135
3. Modified page	0.0037		1.4133						0.9926	0.00209	0.00470
4. Henderson& pabis	0.0041			1.073					0.9668	0.00087	0.00195
5. Logarithmic	0.0015			1.801		-0.7976			0.9988	0.00223	0.00535
6. Two term	0.004	0.004		0.537	0.537				0.9668	0.00286	0.00736
7. verma et al	0.001			7.027			0.001		0.9990	1.01222	2.42934
8. Modified Henderson&pabis	0.004			0.55	0.261	0.261	0.004	0.004	0.9668	0.00259	0.00777

ตารางผนวกที่ ข8 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณห์ภูมิ 70 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 5 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.0047								0.9382	3.18E-05	6.81E-05
2. Page	0.0002		1.5715						0.9896	6.03E-03	1.39E-02
3. Modified page	0.0046		1.5715						0.9896	1.46E-03	3.38E-03
4. Henderson& pabis	0.0052			1.092					0.9499	1.03E-03	2.39E-03
5. Logarithmic	0.0015			2.2526		-1.2407			0.9974	6.42E-04	1.60E-03
6. Two term	0.01	0.01		-85.237	86.202				0.9850	2.95E-01	8.04E-01
7. verma et al	0.001			9.115			0.001		0.9970	1.05E+00	2.62E+00
8. Modified Henderson&pabis	0.005			0.532	0.28	0.28	0.005	0.005	0.9500	4.26E-03	1.42E-02

ตารางผนวกที่ ข9 ผลทางสถิติที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชิ้นบางหนอนแมลงวันลายอุณห์ภูมิ 70 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วรอบพัดหมุน 10 รอบต่อนาที

Model name	Model Constans								R ²	RMSE	X ²
	k ₁	k ₂	n	a	b	c	g	h			
1.Newton	0.005								0.9710	0.00369	0.00790
2. Page	0.001		1.29						0.9900	0.00010	0.00023
3. Modified page	0.005		1.29						0.9900	0.00380	0.00878
4. Henderson& pabis	0.005			1.048					0.9750	0.00002	0.00005
5. Logarithmic	0.002			1.636		-0.648			1.0000	0.00128	0.00320
6. Two term	0.009	0.009		52.809	-51.837				0.9910	0.24640	0.67199
7. verma et al	0.003			1.1			-0.002		0.9990	0.00412	0.01031
8. Modified Henderson&pabis	0.005			0.545	0.251	0.251	0.005	0.005	0.9750	0.00003	0.00011





เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน



ลักษณะภายในเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหมุน

พหุ ประสิทธิภาพ

เครื่องชั่งดิจิตอลละเอียด ± 0.001 (ยี่ห้อ Brifit)



ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลพิกัดเครื่องชั่งดิจิตอลละเอียด ± 0.001 (ยี่ห้อ Brifit)

รายละเอียด	พิกัด
Capacity/Readability	50 g -0.001 g
Display	LED Display with Orange Backlight
Weighing Modes	g/oz/ozt/dwt/ct/gn
Auto-off time	180 Second off
Power Supply	2 x AAA battery

เครื่องวัดอุณหภูมิ 12 ช่อง รุ่น BTM-4208SD



ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลพิักการใช้งานเครื่องมือ

General Specification			
Circuit		Custom one-chip of microprocessor LSI circuit.	
Display		LCD size: 82 mm x 61 mm. <i>*with green color backlight.</i>	
Channels		T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11 and T12.	
Sensor type		Type K thermocouple probe. Type J/T/E/R/S thermocouple probe	
Resolution		0.1°C/1°C, 0.1°F/1 °F.	
Datalogger Time Setting range	Sampling	Auto	1 second to 3600 second @ sampling time can set to 1 second ,but memory data may loss
		Manual	Push the data logger button once will save data one time. @Set the <i>sampling time to 0 second</i>
Data error no.		no. 0.1% of total saved data max.	
Loop Datalogger		. The record time can set for the duration every day. For example the user <i>intend</i> set the record time from the 2:00 to 8:15 every day or record time 8:15 to 14:15.	
Memory card		SD memory card. 1 GB to 16 GB.	
Advanced setting		* Set clock time (Year/Month/Date, Hour/Minute/Second) * Set loop time of recorder * Decimal point of SD card setting * Auto power OFF management * Set beep Sound ON/OFF * Set temperature unit to °C or °F * Set sampling time *SD memory card Format	
Temperature Compensation		automatic temp. compensation for the type K/J/T/E/R/S thermometer.	
Linear Compensation		Linear Compensation for the full range	
Offset Adjustment		To adjust the zero temperature deviation value	
Probe Input Socket		2 pin thermocouple socket. 12 sockets for T1 to 12.	
Over Indication Show		Show "-----"	

Data hold	RS 232/USB PC computer interface. * <i>Connect</i> the optional RS232 cable UPCB-02 will get the RS232 plug. * Connect the <i>optional</i> USB cable USB-01 will get the USB plug.
Power off	Freeze the display reading. Maximum & Minimum value. Approx. 1 second. the display reading. Maximum & Minimum value. Approx. 1 second
Operating temperature	0 to 50 °C.
Operating Humidity	Less than 85% R.H.
Power supply	Alkaline or heavy duty DC 1.5 V battery (UM3,AA) x 8 PCs, or equivalent DC 9V adapter input. (AC/DC power adapter is optional)
Power Current	Normal operation (w/o SD card save data and LCD Backlight is OFF): Approx. DC 7.5 mA.
	When SD card save the data but and LCD Backlight is OFF): Approx. DC 25 mA.
	<i>*If LCD backlight on, the power consumption will increase approx. 11 mA.</i>
Weight	Meter: 827 g/1.84 LB.
Dimension	225 X 125 X 64 mm (8.86 X 4.92 X 2.52 inch)
Accessories Included	Instruction manual..... 1 PC Type K Temp. probe, T.....2 PC *Hard carrying case, CA-08..... 1 PC *SD memory card (2 GB).....1 PC
Optional Accessories	*Type K thermocouple probe TP-01, TP-02A. TP-03, TP *USB cable, USB-01 * RS232 cable, UPCB-02. *Data Acquisition software, SW-U811-WIN. *AC to DC 9V adapter

เครื่องชั่งน้ำหนัก OHAUS รุ่น PA4102



ตารางผนวกที่ ค3 ข้อมูลเพื่อการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนัก OHAUS รุ่น PA4102

ข้อมูลทั่วไป	พิกัด
พิกัดกำลัง	4100 กรัม
ความละเอียด	0.01 กรัม
ขนาดถาด	กลม 180 มิลลิเมตร
จอแสดงผล	ตัวเลข LED พร้อม Blacklight
แหล่งพลังงาน	ADAPTER
การ калиเบรต	External Calibration
ผู้ผลิต	USA

www.weightscalethailand.com/index.php?lay=show&ac=cat_show_pro_detail&pid=85117

แอมมิเตอร์ไฟฟ้า (6IN1 Din Rail AC Monitor)



ตารางผนวกที่ ค4 ข้อมูลพิกัดแอมมิเตอร์ไฟฟ้า

ข้อมูลทั่วไป	พิกัด
ค่าความแม่นยำ	1%±2
แรงดันไฟ (Voltage)	AC:250-450 V
กระแสไฟ (Current)	0.0-100.0 A
Active power	0-30,000 W หรือ 0-45,000 W
ความถี่ (Frequency)	45.00 Hz – 65 Hz
ค่าพลังงาน (Energy)	0-99,999 Kwh
Power factor	0.00 – 1.00 PF

อ้างอิง <https://www.lazada.co.th/products/6in1-din-rail-ac-monitor-110v-220v-380v-100a-power-factor-active-kwh-volt-amp>

Anemometer UT363S Digital



ตารางผนวกที่ ค5 ข้อมูล Anemometer UT363S Digital

Specifications	Range	Resolution	Accuracy
	0.4~30 m/s	0~99:0.01	±(5%±0.5m/s)
	1.4~108 km/h	100~999:0.1	±(5%±1.5km/h)
	78~5905 ft/min	≥1000:1	±(5%±10ft/min)
	0.7-58 knots		±(5%±1knot)
	0.8-67 mph		±(5%±1mph)
Temperature	-10 ~50 °C	0.1 °C	±2.0°C
	14~122 °F	0.2 °F	±4.0°F
Wind scale	0~12	1	±1

ตารางผนวกที่ ค5 ข้อมูล Anemometer UT363S Digital (ต่อ)

Features	
Sampling rate	0.5s
Units	m/s, km/h, ft/min, knots, mph, °C/°F
Overload indication	✓
Auto range	✓
Auto power off	✓
Low battery indication	✓
Data hold	✓
MAX/MIN/AVG	✓
Backlight	✓
Working temperature	0 °C ~ 40 °C
1m drop test	✓
Power	1.5 battery (R03) x 3
Display	35mm x 32mm
Product color	Red and grey
Product net weight	365 g
General Characteristics	
Product size	120 mm x 53mm x 43mm
Standard accessories	Batteries
Standard individual packing	Gift box, blister, English manual
Standard quantity per carton	20 pcs
Standard carton measurement	550 mm x 295 mm x 350 mm
Standard carton gross weight	7.2 kg

อ้างอิง <https://meters.uni-trend.com/product/ut363s/#Specifications>

เครื่องชั่งดิจิตอล SUNFORD รุ่น FEH5000



ตารางผนวกที่ ค6 เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ SUNFORD รุ่น FEH5000

ข้อมูลทั่วไป	พิกัด
พิกัดชั่งสูงสุด	5.000 กิโลกรัม
พิกัดชั่งต่ำสุด	0.004 กิโลกรัม
ความละเอียด	0.001 กิโลกรัม
ขนาดจานชั่ง(กว้าง x ยาว)	14.0 เซนติเมตร x 16.8 เซนติเมตร
ขนาดตัวเครื่อง	17.5 x 24.0 x 8.0 เซนติเมตร

อ้างอิง <https://drive.google.com/file/d/12rf4JVUGMgAZFYg8EP5F9sWy3sgOOKvA/view>

พูน ปณ ภัโต ชีเว





การหาความชื้นหนอแมลงวันลายก่อนอบแห้ง



การนำหนอนแมลงวันลายนำไปใส่ถาดอบแห้ง

พูน ปณ ภิโต ชีเว



การบดหนอนแมลงวันลายอบแห้งก่อนนำไปผสมกับอาหารลดต้นทุนอื่นๆ



การผสมอาหารลดต้นทุนสูตรต่างๆ



การทดลองการเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยสูตรอาหารลดต้นทุน



การเก็บผลผลิตหลังการเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยอาหารลดต้นทุน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นันทวัฒน์ บุตรวงศ์
วันเกิด	21 พฤษภาคม พุทธศักราช 2541
สถานที่เกิด	94 หมู่ที่ 7 ตำบลโนนสูง อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	363 หมู่ที่ 11 ซอยเทคนิค-ร่วมมิตร บ้านหนองเจริญ ตำบลแวงน่าง จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 4400
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ประวัติการศึกษา	พ.ศ 2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ 2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ 2559 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสารคามพิทยาคม จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ 2556 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนกาฬสินธุ์พิทยาสรรพ์ จังหวัดกาฬสินธุ์
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	Sarawut Saenkham, Worawoot Promptow, Nantawat Butwong and Sopa Cansee. (2023). The performances of the high heat gas stove without emissions and gasification system. Engineering Access, 9(2), 126–132. Worawoot Promptow, Sarawut Saenkham, Nantawat Butwong and Sopa Cansee. (2022). Performance of a rectangular downdraft open-top kiln for a dual burner. Engineering Access, 8(2), 325–329.