ทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

นายเมธี เฉียดสระน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

TEST OF CASSAVA PULP DRYER FOR HOUSEHOLD FARMERS

MATEE CHADSANOY

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

ทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ

.....

(ผศ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

.....

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เมธี เฉียดสระน้อย : ทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน (TEST OF CASSAVA PULP DRYER FOR HOUSEHOLD FARMERS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ธีทัต ดลวิชัย, 107 หน้า.

คำสำคัญ : กากมันสำปะหลัง/การลดความชื้น/เครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน/P-value

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน โดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้ม (LPG) วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) ลดความชื้นทางกลด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (2) ทดสอบการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติ (3) ทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบกากมันสำปะหลังโดยศึกษาอุณหภูมิลมร้อนที่ 80, 90, 100 องศาเซลเซียส โดยรูตะแกรงมีขนาด 2 มิลิเมตร ความเร็วลมอยู่ที่ 8, 9, 10 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 10, 15, 20 รอบต่อนาที ควบคุมด้วยแดมเปอร์ (Volume Damper) นำลมร้อนบางส่วนมาใช้ใหม่เพื่อลดการสูญเสียลมร้อนในห้องอบกากมันสำปะหลัง ปริมาณกากมันสำปะหลังในการทดลองครั้งละ 15 กิโลกรัม โดยใช้กากมันสำปะหลังที่มีความชื้นฐานเปียก (wet basis) ตั้งต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 78 w.b. ประเมินสมรรถนะการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเวลาในการอบแห้งความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ผลจากการทดสอบพบว่าตัวแปรควบคุมที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างเป็นนัยสำคัญโดยเรียงลำดับดังนี้ 1.อุณหภูมิ($P=6.75\times10^{-12}$) 2.ความเร็วรอบ($P=8.24\times10^{-5}$) 3.ความเร็วลม($P=0.43$) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังคือ อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาทีและความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 20 รอบต่อวินาที เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 4.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำและระยะเวลาต่ำสุดคือ 5.52 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ และ 2.5 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยกากมันสำปะหลังมีความชื้นเฉลี่ย 12.47 w.b. กากมันสำปะหลังแห้งที่ได้สามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ 1.อยู่ในตะแกรงสัดส่วนเฉลี่ย 69.94 เปอร์เซ็นต์ 2.ลอดผ่านรูตะแกรงสัดส่วน 30.06 เปอร์เซ็นต์ ได้กากมันสำปะหลังแห้งรอบละ 1.98 กิโลกรัมต่อรอบ ผลจากการใช้เป็นอาหารสัตว์ทดแทน ในไก่กระทงอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ สูงสุด2,437 ตัวต่อวัน สามารถลดต้นทุนค่าอาหารได้ร้อยละ 2.48 ของราคาอาหารทั้งหมด ในปลานิลแปลงเพศอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์ สูงสุด 1,293 ตัวต่อวัน สามารถลดต้นทุนค่าอาหารได้ร้อยละ 8 ของราคาอาหารทั้งหมด

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนักศึกษา เมธี เฉียดสระน้อย

ปีการศึกษา 2565 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

MATEE CHADSANOY : TEST OF CASSAVA PULP DRYER FOR HOUSEHOLD FARMERS THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TEETUT DOLWICHAI, Ph.D. 107 PP.

Keywords : Cassava Pulp/ Dehumidifier/ Cassava Pulp Dryer for Household Farmers/ P-value

This research aims to study the Cassava Pulp Dryer for household Farmers with LPG. The Research Methodology has three phases, namely: Phase 1. Mechanical dehumidifier with extruder machine. Phase 2. Dehumidifying with natural and phase 3. Dehumidifying with cassava pulp dryer machine. The data were analyzed by the control variable includes hot air. The temperature was 80, 90, 100 C° with 2 mm. of the screen, Air velocity was 8, 9, 10 m/s, and RPM of motors was 10, 15, 20 rev/min control with volume damper. Using cassava pulp which has humidity in 78%w.b. Drying characteristics, drying rate, drying time, final moisture content and specific energy consumption (SEC) were determined to evaluate drying.

It was found that the control variables that had a significant effect on the drying rate were as follows: 1. Temperature ($P = 6.75 \times 10^{-12}$) 2. Air velocity ($P = 8.24 \times 10^{-5}$) 3. rotational speed ($P = 0.43$). The result of the most suitable drying is drying air temperature of 100 C° rotational speed was 20 rev/min and air velocity was 9 m/s since it gave the highest drying rate of 69.08 $\frac{kg_{water}}{h}$, the specific energy consumption and drying time of 5.52 $\frac{MJ}{kg_{water}}$ and 2.5 h, respectively. The final moisture content and dry solid of residue cassava pulp in the sieve were 12.47% w.b. and 63.91% w.b., respectively. The result of using cassava pulp as an animal feed substitute in 10 percent, up to 2,437 birds per day, can reduce feed costs by 2.48% of the total feed price. In the 25 percent ratio of transgender tilapia to a maximum of 1,293 fish per day, food costs could be reduced by 8%.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่ ผศ.ดร.ธีทัต ดลวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

เมธี เฉียดสระน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ฌ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 2

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 ตารางการดำเนินงานวิจัย 3

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กล่าวนำ 4

2.2 มันสำปะหลัง 4

2.3 การปลูกกากมันสำปะหลังภายในประเทศไทย 5

2.4 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง 8

2.5 กากมันสำปะหลัง 9

2.6 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ 11

2.6.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ 11

2.6.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ 12

2.6.3 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสุกร 12

2.6.4 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารโคเนื้อ 13

2.7 ทฤษฎีการอบแห้ง 14

2.7.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics) 14

2.7.2 การหาค่าความชื้นของอาหาร และวัสดุทางการเกษตร 17

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 เครื่องอบแห้ง 21
2.8.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูชั่น 21
2.8.2 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช 22
2.8.3 เครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรอื่น 25
2.8.4 เครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์ 30
2.9 ความสิ้นเปลืองพลังงาน 34
2.9.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน 35
2.9.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 35
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
3. วิธีดำเนินการวิจัย 38
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินทดลอง 39
3.2 วิธีการ 41
3.2.1 การหาค่าความชื้นตั้งต้นเฉลี่ย 41
3.2.2 ส่วนประกอบและการทำงานเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลัง เครื่องต้นแบบ 42
3.2.3 เตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่น 44
3.2.4 วิธีการเตรียมกากมันสำปะหลัง 45
3.2.5 รายละเอียดเครื่องอบแห้ง 45
3.2.6 การตากแห้งลานปูน 46
3.2.7 วิเคราะห์การประเมินการนำไปใช้เพื่อการลดต้นทุนเป็นอาหารสัตว์ทดแทน 50
3.2.7.1 วิเคราะห์การประเมินการใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ 50
3.2.7.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ 52
3.3 สถานที่ทำการทดลอง 53
3.4 ระยะเวลาทำการทดลอง 53
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 54
4.1 ผลการทดลองค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสด 54
4.2 ผลการทดลองลดค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสดด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 ลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้ง 56
4.2.2 สมรรถนะของเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน 59
4.3 ประเมินการนำไปใช้เพื่อการลดต้นทุนเป็นอาหารสัตว์ทดแทน 73
4.3.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ 74
4.3.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ 74
5. สรุปผลการทดลอง 77
5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง 77
5.2 การทดสอบด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลัง เครื่องต้นแบบ 77
5.2.1 การศึกษาทดลองหาอุณหภูมิ ความเร็วรอบและความเร็วลมหมุนเวียนที่เหมาะสม 77
5.2.2 การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ กับการตากลานปูน 78
5.2.3 ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับภาคครัวเรือน 78
5.2.3.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ 78
5.2.3.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ 78
5.3 ข้อเสนอแนะ 79
รายการอ้างอิง 80
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ 83
ภาคผนวก ข ผลการทดลองและข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง 87
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ 93
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างศึกษา 96
ประวัติผู้เขียน 107

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1-1 การส่งออกกากมันสำปะหลังเดือนเมษายนของประเทศไทยปี 2562 และปี 2561 1
1-2 ราคากากมันสำปะหลังปี 2557 ถึง 2561 2
2-1A เนื้อที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังระดับภาคประจำปี 2563.....6
2-1B เนื้อที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังระดับจังหวัดประจำปี 2563.....7
2-2 องค์ประกอบทางโภชนาการของกากมันสำปะหลัง.....9
2-3 อัตราส่วนหลังการคัดขนาดและจำนวนกระจุกเส้นใย..... 10
2-4 ผลของระดับกากมันสำปะหลังต่อลักษณะซากไก่เนื้อ..... 11
2-5 องค์ประกอบทางโภชนาการของกากมันหมักยีสต์..... 12
2-6 ผลของการใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำกากส่าเหล้า ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต..... 13
2-7 การเจริญเติบโตโคเนื้อที่เลี้ยงด้วยกากแป้งมันสำปะหลังหมักยีสต์ 13
3-1 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง..... 47
3-2 ปริมาณอาหารที่ไก่กินของไก่กระทงเลี้ยงแบบคละเพศ 51
3-3(A) ปริมาณอาหารการเลี้ยงปลานิลขาวแปลงเพศ 52
3-3(B) ปริมาณอาหารการเลี้ยงปลานิลขาวแปลงเพศ..... 52
4-1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสด 54
4-2 ผลการทดลองหาความชื้นของกากมันสำปะหลังสดหลังผ่านการลดความชื้นทางกล 55
4-3 ผลการอบแห้งที่ความเร็วลม และความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส..... 61
4-4 ผลการอบแห้งที่ความเร็วลม และความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส..... 63
4-5 ผลการอบแห้งที่ความเร็วลม และความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส..... 65
4-6(A) ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง 66
4-6(B) ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง 66
4-6(C) ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง 66
4-7 ราคาต้นทุนการใช้อาหารไก่พันธุ์เนื้อร่วมกับกากมันสำปะหลัง 74
4-8 ราคาต้นทุนการใช้อาหารปลากินพืชร่วมกับกากมันสำปะหลัง..... 75
ข1 ค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสด..... 87
ข2 ผลการทดลองหาความชื้นของกากมันสำปะหลังสดหลังผ่านการลดความชื้นทางกล 87
ข3 ข้อมูลการทดสอบการไล่ความชื้นด้วยวิธีการตากลานปูน 88
ข4 ข้อมูลการทดสอบการไล่ความชื้นด้วยวิธีการตากลานปูน 89
ข5 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน 88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข5-1 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน 89
ข5-2 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน 89
ข5-3 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน 90
ข5-4 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน 90

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 9
2.2 จำนวนเส้นใยที่มีความยาวต่าง ๆ ของกากมันสำปะหลัง แต่ละส่วนเทียบกับเส้นใยสั้น 10
2.3 การลดลงของความชื้นวัสดุ 14
2.4 การอบแห้งวัสดุจากสิ่งมีชีวิต ในช่วงอัตราการอบแห้ง ลดลงและคงที่ 17
2.5 แสดงลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง 18
2.6 Schematic of the food drying phenomenon 19
2.7 ส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) 22
2.8 แสดงเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชนิดถังเก็บแบบต่าง ๆ 23
2.9 การเคลื่อนที่ของโซนการอบแห้ง 24
2.10 ลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง 24
2.11 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน โดยมีผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของโฟม 25
2.12 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบไหลสวนทาง 26
2.13 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบไหลตาม 27
2.14 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด 27
2.15 เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว 28
2.16 รูปแบบของคลีบแบบต่าง ๆ (Flights and Lifters of Rotary Drum) 29
2.17 เครื่องอบแห้งแบบไม่อาศัยตัวกลาง 30
2.18 การรับรังสีอาทิตย์แบบธรรมชาติ 31
2.19 การรับรังสีอาทิตย์โดยตรง 31
2.20 การรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม 32
2.21 การรับรังสีอาทิตย์แบบผสม 33
2.22 เครื่องอบแห้งแบบอาศัยตัวกลาง 33
2.23 เครื่องอบแห้งแบบผสม 34
3.1 เครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ 40
3.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เครื่องต้นแบบ 40
3.3 ตู้อบหาความชื้น 40
3.4 เครื่องวัดรอบ 40
3.5 เครื่องวัดความเร็วลม 41
3.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ 41

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 41
3.8 อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า 41
3.9 ตัวอย่างกากมันสำปะหลังสด 42
3.10 ถ้วยฟอยล์ขนาด 1.5 นิ้ว 42
3.11(A) ตัวอย่างกากหลังอบ 42
3.11(B) ตัวอย่างกากหลังอบ 42
3.12 รูปแบบของคลีบ (Flights and Lifters of Rotary Drum) 43
3.13 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทาง (counter-flow dryer) 43
3.14(A) กากมันสำปะหลังที่ค้างภายในตะแกรง 44
3.14(B) กากมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรง 44
3.15 แบบร่างประกอบเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) 44
3.16 รายละเอียดเครื่องอบแห้ง 45
3.17 กากมันสำปะหลังสด 46
3.18 ความหนาในการตากลานปูน 46
3.19 พื้นที่ในการตาก 46
3.20 เขี่ยกากมันที่จับตัวเป็นแผ่น 46
4.1 ลักษณะกากมันสำปะหลังสด 55
4.2 ลักษณะกากมันสำปะหลังสดที่ผ่านการลดความชื้นทางกล 55
4.3 กากมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรง 56
4.4 กากมันสำปะหลังที่ค้างภายในตะแกรง 56
4.5(A) อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 57
4.4(B) อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 58
4.4(C) อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 58
4.6 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง 59
4.7 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง 59
4.8(A) สมรรถนะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 60
4.8(B) สมรรถนะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 62
4.8(C) สมรรถนะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 64
4.9 สมรรถนะการอบแห้ง 67
4.9(A) สมรรถนะการอบแห้ง 67
4.9(B) สมรรถนะการอบแห้ง 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.9(C) สมรรถนะการอบแห้ง 68
4.10 ลดความชื้นด้วยการตากลานปูน 70
4.11(A) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 71
4.11(B) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 71
4.11(C) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 72
4.12 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน 72
4.13 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MR	=	อัตราส่วนความชื้น (% w.b.)
M_d	=	ความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)
M_w	=	ความชื้นฐานเปียก (% w.b.)
M_t	=	ความชื้นของวัสดุที่เวลาใด ๆ (% w.b.)
W	=	มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)
d	=	มวลแห้งของวัสดุ (กิโลกรัม)
$m_{p,i}$	=	น้ำหนักก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม)
$m_{p,f}$	=	น้ำหนักหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)
h_g	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
k_g	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายมวล
T_{sf}	=	อุณหภูมิพื้นผิวผลิตภัณฑ์
T_g	=	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง
P_{vg}	=	water vapor partial pressure of air
P_{vsf}	=	water vapor partial pressure of surface
W_1	=	มวลก่อนทำการอบแห้ง (กิโลกรัม)
M_{eq}	=	ความชื้นสมดุล (%w. b.)
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง (MJ/kg_{water})
SEC_{LPG}	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพลังงานความร้อนในระบบ
SEC_{PE}	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพลังงานไฟที่ใช้ในระบบ
W_{loss}	=	น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (กิโลกรัม)
P_e	=	ค่าพลังงานไฟฟ้า (kW.hr)
Energy	=	พลังงานไฟฟ้าที่เข้ามาในระบบ (kW)
HHV	=	ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
M	=	น้ำหนักเชื้อเพลิง (กิโลกรัม)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (kg/hr)
t	=	เวลา (hr)
P	=	กำลัง (W)
E	=	แรงดันไฟฟ้า (V)
I	=	กระแส (A)
PS_{inside}	=	เปอร์เซ็นต์มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรง
$PS_{outside}$	=	เปอร์เซ็นต์มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านรูตะแกรง
$W_{d,in}$	=	มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรง (กิโลกรัม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$W_{d,out}$	=	มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)
$W_{d,total}$	=	มวลแห้งของกากมันสำปะหลังทั้งหมด (กิโลกรัม)
W_{water}	=	น้ำหนักน้ำภายในวัสดุ (กิโลกรัม)
W_{dry}	=	มวลแห้งของวัสดุ (เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด) (กิโลกรัม)
$W_{water\ total}$	=	น้ำหนักน้ำทั้งหมดภายในวัสดุ (กิโลกรัม)
W_{inside}	=	น้ำหนักน้ำในวัสดุภายในถังอบ (กิโลกรัม)
$W_{water\ through}$	=	น้ำหนักน้ำในวัสดุภายใน ที่ลอดผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)
W_{loss}	=	น้ำหนักน้ำที่ระเหยในกระบวนการอบแห้ง (กิโลกรัม)
$W_{outside}$	=	น้ำหนักน้ำในวัสดุภายในตะแกรง (กิโลกรัม)
GPS	=	เปอร์เซ็นต์การร่วงผ่านตะแกรง
GW	=	มวลกากมันสำปะหลังแห้งที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (kg)
AW	=	มวลกากมันสำปะหลังแห้งทั้งหมด (kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากรายงานในภาคการส่งออกของกากมันสำปะหลังเดือนเมษายน 2562 มีปริมาณ 45,624 ตัน เปรียบเทียบกับเดือนเมษายน 2561 ซึ่งมีปริมาณ 6,600 ตัน ปริมาณการส่งเพิ่มขึ้น 39,024 ตัน หรือ 85 เปอร์เซ็นต์ ในภาคการส่งออก และราคากากมันสำปะหลังในช่วงปี 2557 ถึง2561 มีแนวโน้มสูงขึ้น นั้นแปลว่ามีความต้องการภายในและต่างประเทศที่สูงขึ้นจาก ตารางที่ 1-1 และ1-2 ตามลำดับ (สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังประเทศไทย)

ตารางที่ 1-1 การส่งออกกากมันสำปะหลังเดือนเมษายนของประเทศไทยปี 2562 และปี 2561

ประเทศ	เมษายน 2561		เมษายน 2562	
	ปริมาณ(ตัน)	มูลค่า(บาท)	ปริมาณ(ตัน)	มูลค่า(บาท)
นิวซีแลนด์	-	-	25,348.755	107,515,654
ตุรกี	-	-	10,500.000	42,874,108
เกาหลีใต้	6,600.000	24,101,679	9,575.000	40,311,122
จีน	-	-	200.000	942,546
ลาว	-	-	-	-
สิงคโปร์	-	-	-	-
ฟิลิปปินส์	-	-	-	-
มาเลเซีย	-	-	-	-
รวม	6,600.00	24,101,679	45623.755	191,643,430

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 1-2 ราคากากมันสำปะหลังปี 2557 ถึง 2561

เดือน	ปี 2557	ปี 2558	ปี 2559	ปี 2560	ปี 2561
มกราคม	3.80-3.95	2.15-2.25	1.65-1.80	2.35-2.50	3.00-3.15
กุมภาพันธ์	3.50-3.85	2.15-2.20	1.65-1.80	2.40-2.50	3.15-3.25
มีนาคม	3.40-3.65	2.10-2.15	1.65-1.80	2.40-2.60	3.20-3.35
เมษายน	2.90-3.00	1.80-2.15	1.65-1.80	2.40-2.60	3.35-3.40
พฤษภาคม	3.00	1.80-2.00	1.75-2.20	2.40-2.60	3.35-3.45
มิถุนายน	2.80-3.00	1.80-2.00	2.00-2.30	2.40-2.60	3.35-3.50
กรกฎาคม	3.00	1.80-2.00	2.10-2.40	2.45-2.70	3.35-4.00
สิงหาคม	3.00	1.90-2.20	2.20-2.50	2.45-2.70	3.50-4.00
กันยายน	3.00-3.10	1.90-2.20	2.20-2.50	2.45-2.80	3.60-4.00
ตุลาคม	2.50-3.10	1.80-2.00	2.00-2.40	2.60-2.80	3.60-4.00
พฤศจิกายน	2.15-2.80	1.80-2.00	2.00-2.30	2.75-2.90	3.30-4.00
ธันวาคม	2.15-2.30	1.70-2.00	2.00-2.40	2.80-3.10	

*ราคาต่ำสุด-สูงสุด หน่วย:บาท/กิโลกรัม

ทำให้ปัจจุบันเกษตรกรต้องหาวิธีแปลรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ทดแทน เช่น การใช้กากมันสำปะหลังในอาหารสัตว์น้ำโดยใช้ให้อาหารปลานิลมีอัตราส่วนในการผสม ปลาบ่น 1/4 ส่วน ลำละเอียด 1/4 ส่วน และกากมันสำปะหลัง 2/4 ส่วน หรืออาหารโคขุน(ที่น้ำหนักโคขุน 150 กิโลกรัม) ใบหรือหัวมัน 1/2 ส่วน และกากมันสำปะหลัง 1/2 ส่วน แต่เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีความชื้นสูงทำให้สามารถเน่าบูดได้ง่าย จึงทำให้กระบวนการแรกสุดในการเก็บรักษา ก่อนที่จะนำไปทำอาหารสัตว์ทดแทนคือ การไล่ความชื้นให้กากมันสำประหลังมีความชื้นฐานเปียก 13 w.b. แต่เนื่องด้วยเครื่องจักรที่มีต้นทุนที่สูง ทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่เลือกที่จะขายกากมันสำปะหลังที่ออกมาจากกระบวนการผลิตแป้งมันมีความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 78 w.b. (วีรชัย และคณะ,2552) เพื่อลดภาระต้นทุนการแปลรูป จึงทำให้ขาดรายได้ในส่วนนี้ไป

จากปัญหาดังกล่าว จึงมีการศึกษาออกแบบออกแบบและสร้างเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน โดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้มและแก๊สชีวมวล เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วลม อุณหภูมิลมร้อน ความเร็วรอบถังคลีบตะแกรง ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น มาเปรียบเทียบกับการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ออกแบบและสร้างเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนโดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้มหรือแก๊สชีวมวล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1). ต้นแบบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังมีความจุห้องอบแห้งขนาด 0.26 ลูกบาศก์เมตร

2). ตัวแปรควบคุมในการทดลองอบกากมันสำปะหลังอุณหภูมิอยู่ที่ 80, 90 และ100 องศาเซลเซียส ความเร็วลมอยู่ที่ 8, 9, 10 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบถังคลีบตะแกรง 10, 15, 20 รอบต่อนาที

3). สามารถอบแห้งกากมันสำปะหลังรอบละ 15 กิโลกรัม

4). กากมันปะหลังที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นฐานเปียกตั้งต้นไม่เกิน 80 w.b.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1). เครื่องอบกากมันสำปะหลังที่ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้มหรือแก๊สชีวมวล

2). ได้เงื่อนไขการทำงานของเครื่องอบกากมันสำปะหลังที่ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้มหรือแก๊สชีวมวล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

กล่าวถึงทฤษฎีและงานที่วิจัยเกี่ยวกับการอบแห้ง ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย สำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

2.2 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (Tapioca หรือCassava) เป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีการเก็บสารอาหารสะสมไว้ที่ราก จัดอยู่ในจัดอยู่ในตระกูล Euphorbiaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Manihot esculenta Crantz ลักษณะทางกายภาพเป็นพุ่มขนาดเล็ก โดยมีถิ่นกำเนิดจากประเทศอเมริกาใต้ เป็นพืชที่มีระยะเวลาเพาะปลูก 6 เดือน ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวได้ถึง 16 เดือน มีความทนทานต่อลักษณะสภาพอากาศภายในประเทศไทย สามารถปลูกได้ทุกภูมิภาคของประเทศไทย สามารถปลูกได้แม้ในพื้นที่ที่ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่

1). ชนิดหวาน (Sweet Type) เป็นมันสำปะหลังที่ใช้เพื่อการบริโภค มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิค (Hydrocyanic acid) ต่ำไม่มีรสขม สามารถใช้หัวสดทำอาหารได้โดยตรง ซึ่งได้แก่ พันธุ์ห้านาที ,พันธุ์ระยอง 2 เป็นต้น

2). ชนิดขม (Bitter Type) เป็นมันรสขมไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์หรือใช้หัวสดโดยตรง เนื่องจากมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคสูง มีพิษต่อร่างกาย นิยมไปแปรรูปและใช้เป็นอาหารสัตว์ ซึ่งได้แก่ พันธุ์ระยอง 1 ,พันธุ์ระยอง 13 ,พันธุ์ระยอง 5 ,พันธุ์ระยอง 60 ,พันธุ์ระยอง 90 และเกษตรศาสตร์ 50

มันสำปะหลังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนทั้ง หัวสด ใบ ลำต้น และเมล็ด นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหาร เนื่องจากเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญของคน และสัตว์อีกทั้งยังสามารถ นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง ได้แก่ มันเส้น (Tapioca chips) มันอัดเม็ด (Tapioca pellets) และแป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบอาหารที่เหมาะสมสำหรับการใช้เลี้ยงสัตว์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งคุณค่าทางโภชนาการของมันสำปะหลังประกอบด้วยแป้ง 70 - 80 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 3 - 5 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 2.5 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใย 3 -3.5 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ มันสำปะหลังส่วนใหญ่มีสารประกอบจำพวกแป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อย และดูดซึมได้ง่ายจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบแหล่งพลังงานสำหรับสัตว์กระเพาะเดี่ยว แป้งในมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นแป้งอ่อน (soft starch) ทำให้สัตว์สามารถย่อย และดูดซึมได้รวดเร็ว เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งอ่อนจะดูดซับน้ำไว้ในโมเลกุลได้อย่างรวดเร็วทำให้เอนไซม์อะไมเลส (amylase) ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์จึงส่งผลดีต่อระบบย่อยอาหารและการดูดซึมสารอาหาร อีกทั้งมันสำปะหลังมีการปนเปื้อนของสารพิษจากเชื้อรา อาทิเช่น อะฟลาทอกซิน และซีราลีโนนในปริมาณที่น้อยหรือไม่มีเลยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพด เนื่องจากมันสำปะหลังไม่อยู่ในกลุ่มอาหารที่ดีสำหรับเชื้อ Aspergillus flavus ทำให้มีโอกาสสร้างอะฟลาทอกซินน้อย (อุทัย และสุกัญญา, 2527; สำโรช, 2547)

2.3 การปลูกกากมันสำปะหลังภายในประเทศไทย

มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่สำคัญของประเทศในเขตร้อน โดยเฉพาะในทวีปแอฟริกา อเมริกาใต้ และเอเชียบางประเทศ เช่น อินโดนีเซีย อินเดีย และฟิลิปปินส์ เนื่องจากเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญของคนและสัตว์ ซึ่งเป็นพืชอาหารในอันดับที่ 5 ของโลก รองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2547) ประเทศไทยถือว่าเป็นแหล่งส่งมันสำปะหลังที่ใหญ่ที่สุดในเขตอาเซียน คาดการณ์ผลผลิตมันสำปะหลัง 29.883 ล้านตัน : ต.ค.2563 - ก.ย.2564 โดยมีมูลค่าการส่งออกภายในประเทศ 51,345.46 ล้านบาท :ม.ค. - พ.ค.2564 เพิ่มขึ้นจากปี 2563 มากถึง 36.38 เปอร์เซ็นต์ (สมคมโรงงานมันสำปะหลังแหล่งประเทศไทย, 2564)

ซึ่งพื้นที่การเก็บเกี่ยวภายในประเทศมากกว่า 9 ล้านไร่ โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือดังตารางที่ 2-1A ที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุดในประเทศไทย ในปี 2563 มีเนื้อที่ปลูกมันสำปะหลัง 5,337,074 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 56 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดภายในประเทศ (สมาคมโรงงานมันสำปะหลังแหล่งประเทศไทย, 2563) นอกจากนั้นในแต่ละปีผลผลิตจากมันสำปะหลังประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ จะถูกนำมาผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลัง ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีเศษเหลือประมาณ 10 – 15 เปอร์เซ็นต์ ของหัวมันสำปะหลังสด (Sriroth et al., 2000) มาจากขั้นตอนการทำความสะอาดการปอกเปลือก และการสกัดแป้ง ซึ่งประกอบด้วย น้ำ เศษดินและทรายเปลือกมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลัง (Cassava Pulp) ประมาณ 3 - 6 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเศษเหลือทั้งหมด

ตารางที่ 2-1A เนื้อที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังระดับภาคประจำปี 2563

ภาค	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่(กก.)	
				เพาะปลูก	เก็บเกี่ยว
เหนือ	2,122,761	2,042,167	6,322,241	2,978	3,096
ตะวันออกเฉียงเหนือ	5,337,074	4,957,392	16,253,447	3,045	3,279
กลาง	1,979,174	1,918,691	6,423,434	3,246	3,348
รวม	9,439,009	8,918,250	28,999,122	3,072	3,252

ที่มา: มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2563)

ตารางที่ 2-1B เนื้อที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังระดับจังหวัดประจำปี 2563

จังหวัด	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่(กก.)	
				เพาะปลูก	เก็บเกี่ยว
เชียงราย	33,088	31,598	81,250	2,456	2,571
พะเยา	21,638	21,112	57,807	2,672	2,738
ลำปาง	40,313	39,782	114,852	2,849	2,887
ลำพูน	3,046	3,041	8,136	2,671	2,675
เชียงใหม่	3,579	3,579	10,468	2,925	2,925
ตาก	139,037	134,064	435,333	3,131	3,247
กำแพงเพชร	713,159	706,739	2,250,642	3,156	3,185
สุโขทัย	87,079	84,733	253,555	2,912	2,992
แพร่	25,499	24,531	72,560	2,846	2,958
น่าน	23,984	23,323	67,058	2,796	2,875
อุตรดิตถ์	28,578	27,472	87,799	3,072	3,196
พิษณุโลก	175,832	163,938	519,398	2,954	3,168
พิจิตร	13,795	13,665	42,479	3,079	3,109
นครสวรรค์	384,583	359,495	1,044,515	2,716	2,906
อุทัยธานี	186,947	174,838	553,312	2,960	3,165
เพชรบูรณ์	242,604	230,257	723,077	2,980	3,140
เลย	303,661	299,470	880,288	2,899	2,939
หนองบัวลำภู	63,242	61,308	191,754	3,032	3,128
อุดรธานี	314,431	308,577	1,078,278	3,429	3,494
หนองคาย	10,554	10,494	31,428	2,978	2,995
บึงกาฬ	6,318	6,318	18,076	2,861	2,861
สกลนคร	126,658	124,520	388,089	3,064	3,117

ตารางที่ 2-1B เนื้อที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังระดับจังหวัดประจำปี 2563(ต่อ)

จังหวัด	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่(กก.)	
				เพาะปลูก	เก็บเกี่ยว
นครพนม	23,639	23,186	62,183	2,631	2,682
มุกดาหาร	139,211	123,749	417,575	3,000	3,374
ยโสธร	113,348	88,325	305,904	2,699	3,463
อำนาจเจริญ	108,654	102,105	321,410	2,958	3,148
อุบลราชธานี	524,003	444,515	1,541,735	2,942	3,468
ศรีสะเกษ	194,822	191,566	619,111	3,178	3,232
สุรินทร์	135,144	135,004	496,180	3,671	3,675
บุรีรัมย์	277,546	268,186	989,256	3,564	3,689
มหาสารคาม	156,248	152,859	488,907	3,129	3,198
ร้อยเอ็ด	63,403	62,703	218,292	3,443	3,481
กาฬสินธุ์	274,692	271,433	971,296	3,536	3,578
ขอนแก่น	241,684	235,940	758,090	3,137	3,213
ชัยภูมิ	735,629	648,646	1,847,589	2,512	2,848
นครราชสีมา	1,524,187	1,398,488	4,628,006	3,036	3,309
สระบุรี	40,873	40,062	120,123	2,939	2,998
ลพบุรี	304,896	296,570	924,160	3,031	3,116
ชัยนาท	81,085	64,160	159,796	1,971	2,491
สุพรรณบุรี	61,908	54,129	167,623	2,708	3,097
นครศรีอยุธยา	13	13	21	1,615	1,615
นครนายก	219	219	777	3,548	3,548
ปราจีนบุรี	117,019	110,612	396,738	3,390	3,587
ฉะเชิงเทรา	219,664	217,849	785,894	3,578	3,608
สระแก้ว	354,850	344,405	1,138,197	3,208	3,305
จันทบุรี	17,236	16,981	57,669	3,346	3,396
ระยอง	36,984	36,595	152,180	4,115	4,158
ชลบุรี	153,018	151,573	586,686	3,834	3,871
กาญจนบุรี	502,591	497,377	1,643,813	3,271	3,305
ราชบุรี	84,132	83,460	275,804	3,278	3,305
เพชรบุรี	3,844	3,844	10,899	2,835	2,835
ประจวบคีรีขันธ์	842	842	3,054	3,627	3,627

ที่มา: มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2563)

2.4 การผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของมันสำปะหลังที่มีคุณภาพสามารถทดสอบเบื้องต้นโดยการนำหัวมันสำปะหลังชั่งน้ำหนัก และทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อตัวสอบวัดความหนาแน่น เพื่อตรวจสอบปริมาณแป้งในหัวมันสำปะหลังโดยอาศัยหลักการลอยตัว (bouyancy) ก่อนเข้ากระบวนการแปรรูป (tapioca starch) (วนิดา เผอิญโชค, 2547) โดยการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีขั้นตอนการผลิตดังนี้

1). การเตรียมวัตถุดิบโดยการทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังและปอกเปลือก

- การร่อนดิน โดยใช้เครื่องร่อนทราย (root siever) เป็นการทำความสะอาดเพื่อทำให้เศษดินและทราย ให้หลุดออกจากผิวมันสำปะหลังด้วยการร่อน (sieve)
- สับแยกเหง้า (chopping) เพื่อแยกเหง้าที่มีลักษณะแข็ง และเหนียวที่เป็นอุปสรรคในการแปรรูป (ขั้นตอนโม่หัวมัน) ออกจากหัวมันสำปะหลัง
- การปอกเปือก (peeling)
- ล้างทำความสะอาด (washing) โดยเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงในการทำความสะอาด

2). โม่หัวมัน (rasping) หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบแล้ว นำเข้าสู่เครื่องโม่หัวมัน (root hopper) ก่อนเพื่อลดขนาดของหัวมันให้เหลือขนาด 1 - 2 นิ้ว จากนั้นนำเข้าสู้เครื่องโม่ (rasper) เพื่อบดพร้อมเติมน้ำเพื่อให้ลักษณะเหลวเข้มข้น (middle fresh pulp) ที่มีส่วนประกอบได้แก่ แป้ง น้ำ กากมัน และสารอาหารต่าง ๆ รวมถึงสารเจือปนต่าง ๆ

3). เครื่องแยกกากหยาบ (coarse extractor) โดยนำมันที่มีลักษณะเหลวเข้มข้นเข้าเครื่องแยกกากหยาบ เพื่อแยกกากมันสำปะหลังออกจากน้ำแป้ง โดยนำน้ำแป้งที่ได้เข้าเครื่องแยกกากหยาบอีกรอบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น

4). เครื่องแยกกากละเอียด (fine extractor) โดยนำน้ำแป้งที่ได้เข้าเครื่องแยกกากละเอียดเพื่อแยกมันสำปะหลัง หรือกากมันอ่อนออกจากน้ำแป้ง

5). ปรับความเข้มข้น โดยนำน้ำแป้งที่ได้เข้าเครื่องแยกน้ำ (separater) 2 รอบ เพื่อให้น้ำแป้งมีความเข้มข้น 20 ^{0}Be (เอนไซม์ Bacillus stearothermphilus) โดยประมาณ

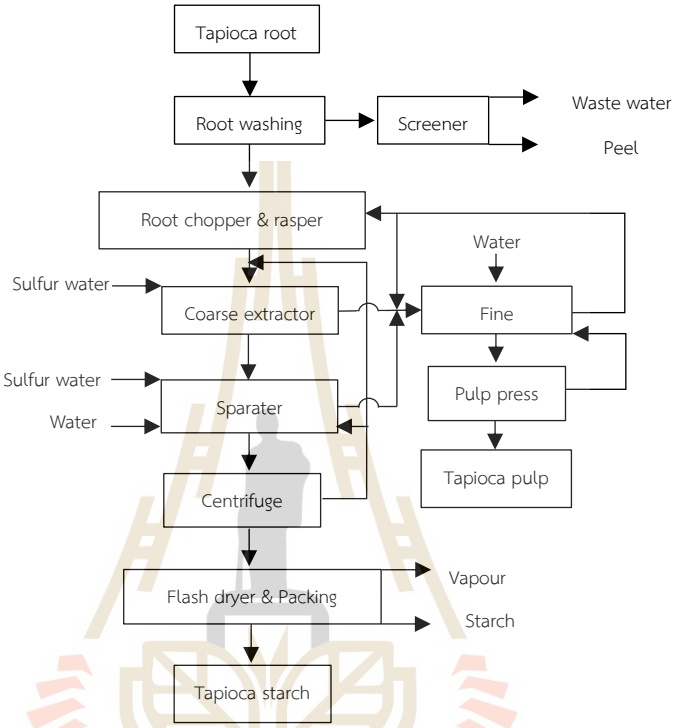
6). เครื่องสลัดแป้ง (centrifuge) โดยนำน้ำแป้งเข้าเครื่องสลัดแป้ง เพื่อแปรสภาพน้ำแป้งให้มีลักษณะเป็นแป้งหมาด

7). เครื่องอบแห้ง (flash dryer) โดยนำแป้งหมาดเข้าเครื่องอบแห้ง เพื่อลดความชื้น

8). เครื่องร่อนแป้ง (siever) แป้งที่ผ่านการอบแห้งนำมาเข้าเครื่องร่อนแป้ง เพื่อคัดแยกขนาดเม็ดแป้ง และนำไปสู่กระบวนการบรรจุภัณฑ์

2.5 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในขั้นตอนการแยกกากหยาบกากละเอียด ดังรูปที่ 2.1 (James Bemiler & Roy Whistler, 2009) กากมันที่ออกมาจากโรงงานจะมีความหนาแน่นเปียกเฉลี่ยเท่ากับ 712.5 kg/m^3 และมีความชื้นเท่ากับ 372.53 d.b. (78.83 w.b.) (วีรชัย และคณะ, 2552)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ที่มา: James Bemiler & Roy Whistler (2009)

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบทางโภชนาการของกากมันสำปะหลัง

References	Dry Matter	Ash	Crude protein	Ether Extract	Crude fiber	Starch
Khempaka et al.(2009)	93.22	2.83	1.98	0.13	13.59	53.55
Teerapatr et al. (2006)	80.13	2.01	2.05	0.15	13.17	65.37
ปรีดา และคณะ (2552)	88.60	5.73	3.42	0.50	14.75	47.97
สุเมธ และคณะ (2552)	89.12	5.32	2.35	0.53	14.57	50.20
ยุวเรศ และคณะ (2550)	88.66	4.50	2.69	0.39	14.75	–
ไกรวุฒิ และคณะ(2550)	97.79	2.65	3.39	0.24	15.26	66.22
อุทัย และคณะ (2545)	88.73	3.64	1.83	0.48	10.38	–
สุทิศา เข็มผะกา (2555)*	89.51	4.91	2.68	0.25	14.38	–

หมายเหตุ: *วิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ มหาวิทยาลัยสุรนารี

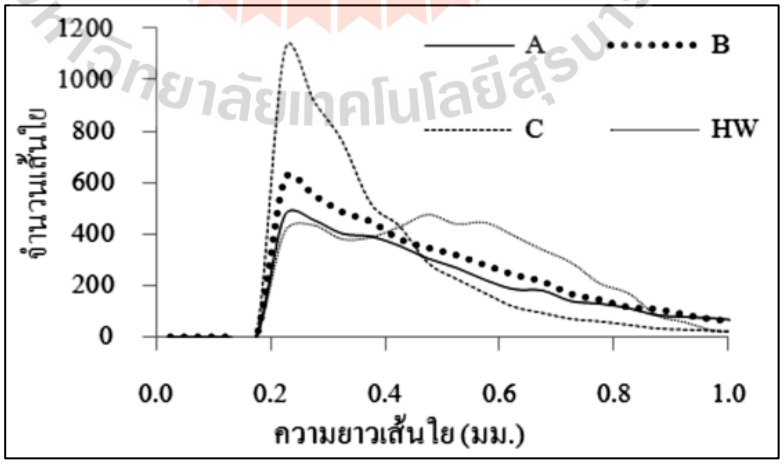
ซึ่งเป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก เนื่องจากมีข้อเสียคือมีกลิ่นเหม็นซึ่งเป็นมลพิษทางกลิ่นแก่บริเวณรอบข้าง ในปัจจุบันได้มีการใช้เอนไซม์สองชนิด คือ Pectinase และ Cellulose ในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแป้งทำให้ได้กากมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งน้อยลง ซึ่งหากนำกากมันปะหลังมาทำให้แห้งจะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้ ปัจจุบันการลดความชื้นกากมันยังใช้วิธีการตากบนพื้นคอนกรีตขนาดใหญ่ในช่วง 8 เดือนที่ไม่มีฝนตก แต่ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ซึ่งส่วนใหญ่ฝนจะตกหนักก็จะทำให้ตากไม่ได้ ทำให้เกิดปัญหาในการจัดการดังนั้นการพัฒนาเครื่องอบแห้งเพื่อนำมาลดความชื้นกากมันสำปะหลัง จะก่อให้เกิดศักยภาพในการนำกากมันสำปะหลัง มาใช้ประโยชน์

(นันทพร ตรีภพนาถ, 2554) ได้ทำการคัดแยกขนาดกากมันสำปะหลังโดยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 25 และ50 เมช พบว่าขนาดระหว่าง 25-50 เมช (B) มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือขนาดเล็กกว่า 50 เมช (C) และ ขนาดใหญ่กว่า 25 เมช (A) ตามลำดับ (เมช คือ จำนวนช่องของตะแกรงในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว เช่น 25 เมช เท่ากับ 25 x 25 ช่อง ต่อ ตารางนิ้ว)

ดังแสดงใน ตารางที่ 2-3 พบว่ากากมันที่ขนาดใหญ่จะมีจำนวนกระจุกเส้นใยอยู่มาก จากรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงผลของความยาวเส้นใยกากมันสำปะหลังขนาดต่าง ๆ และเส้นใยสั้นพบว่ากาก A และ B มีขนาดเส้นใยที่ใกล้เคียงกัน แต่กาก A มีปริมาณน้อยมาก

ตารางที่ 2-3 อัตราส่วนหลังการคัดขนาดและจำนวนกระจุกเส้นใย

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)	จำนวนกระจุกเส้นใย (เปอร์เซ็นต์)
A	13.04	10.50
B	46.40	1.83
C	25.67	0.14



รูปที่ 2.2 จำนวนเส้นใยที่มีความยาวต่าง ๆ ของกากมันสำปะหลัง แต่ละส่วนเทียบกับเส้นใยสั้น
ที่มา: นันทพร ตรีภพนาถ (2554)

2.6 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์

กากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ได้ เนื่องจากมีคาร์โบไฮเดรตหรือแป้งอยู่เหลือประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ และมีเส้นใยสูงประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ (สุทิศา เข็มผกา, 2555) อีกทั้งยังมีปริมาณไซยาไนด์เท่ากับ 16.6 มิลิกรัมต่อลิตร (ยุวเรศ และคณะ, 2550) ซึ่งอยู่ในระดับที่ปลอดภัยในการนำมาใช้ประกอบเป็นอาหารสัตว์ทดแทน (สุทิศา เข็มผกา, 2555)

2.6.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ

ใช้กากมันสำปะหลังมาเป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์ปีก พบว่าสามารถใช้ในสูตรอาหารเนื้อไก่ได้ 5-10 เปอร์เซ็นต์ โดยผลที่ได้พบว่าไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต ดังตารางที่ 2-4 (ปรีดา และคณะ, 2552) แต่การใช้กากมันสำปะหลังในระดับที่มากเกินไป อาจส่งผลต่อการย่อยได้ และแก๊สในกระเพาะอาหาร (ยุวเรศและคณะ, 2550)

ตารางที่ 2-4 ผลของระดับกากมันสำปะหลังต่อลักษณะซากไก่เนื้อ

สมรรถภาพการผลิต	ระบบกากมันสำปะหลัง			SE	P-value	References
	0	5	10			
น้ำหนักไก่มีชีวิต (กรัม)	2752.40	2773.16	2782.50	184.78	0.6596	ปรีดาและคณะ(2552)
น้ำหนักซากสด (กรัม)[ก]	2293.08	2300.91	2307.50	166.48	0.8934	
เปอร์เซ็นต์ซาก[ข]	83.27	82.92	82.79	1.58	0.2561	
ตับ ,กึ๋น ,หัวใจ[ค]	4.06	3.95	3.90	0.48	0.2207	
หัว ,คอ[ค]	8.18	8.20	8.08	0.52	0.3698	
ปีก[ค]	9.38	9.32	9.31	0.42	0.6286	
เนื้อหน้าอก ,หนัง[ค]	26.12	26.13	25.88	1.6	0.6276	
สะโพก[ค]	16.18	16.34	16.46	0.79	0.1637	
น่อง[ค]	12.24	12.35	12.27	0.78	0.7516	
แข้ง[ค]	4.22	4.21	4.23	0.28	0.9082	
ไขมันช่องท้อง[ค]	2.32	2.20	2.24	0.79	0.7261	
โครง[ค]	20.75	20.76	20.86	1.04	0.7875	

หมายเหตุ: [ก] น้ำหนักซากสดปราศจากเครื่องใน

[ข] คำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักแบบมีชีวิต

[ค] คำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักซากสดปราศจากเครื่องใน

ที่มา: ปรีดา และคณะ (2552)

2.6.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ

ใช้กากมันสำปะหลังมาเป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์น้ำ โดยสำนักงานประมงอำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี (2010) สูตรอาหารสัตว์ทดแทนมีสัดส่วนอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ ปลาป่น 12.5 เปอร์เซ็นต์ รำละเอียด 12.5 เปอร์เซ็นต์ กากมันสำปะหลัง 25 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับอาหารสัตว์น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยสูตรอาหารสัตว์น้ำทดแทนนี้มีโปรตีนมากถึง 16.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้ 32.67 เปอร์เซ็นต์

ศูนย์เรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียง ต.ธารปราสาท อ.โนนสูง จังหวัดนครราชสีมา วิจัยสูตรอาหารสัตว์ทดแทนเพื่อทดสอบกับปลานิลขาวแปลงเพศโดยมีส่วนประสม 3 ส่วน ได้แก่ ปลาป่น 12.5 เปอร์เซ็นต์ รำละเอียด 12.5 เปอร์เซ็นต์ กากมันสำปะหลัง 25 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับอาหารสัตว์น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบกับปลานิลขาวแปลงเพศ อายุ 1 เดือน ทดสอบเลี้ยงเป็นระยะเวลา 5 เดือน โดยจะน้ำหนักเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 500 กรัม ความถี่ในการใช้อาหาร 2-3 ครั้งต่อวัน วัยอ่อนปริมาณการให้อาหาร 15 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัว (1-4 เดือน) วัยโตปริมาณการให้อาหาร 6 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัว (5-12 เดือน) จำนวนกลุ่มตัวอย่างทดลอง 100 ตัว โดยผลที่ได้พบว่าไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต (ทางด้านน้ำหนัก)

2.6.3 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสุกร

ใช้กากมันสำปะหลังหมักยีสต์ ในการทำอาหารสัตว์ทดแทนต้นทุนต่ำ สำหรับเป็นอาหารสุกร โดยใช้ผสมร่วมกับอาหารเลี้ยงสุกรแม่พันธุ์และสุกรระยะรุ่น-ขุน ที่มีน้ำหนัก 40 กิโลกรัมขึ้นไปจนถึงจับส่งขายตลาด อัตราส่วนในการผสมของอาหารข้นต่อกากมันหมักยีสต์ 1:2-5 กิโลกรัม มีองค์ประกอบทางโภชนาการดังตารางที่ 2-5 (พิชาด เขจรศาสตร์, 2561)โดยที่ไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการเจริญเติบโตดังตารางที่ 2-6 (สุทิศา เข็มผกา, 2555)

ตารางที่ 2-5 องค์ประกอบทางโภชนาการของกากมันหมักยีสต์

องค์ประกอบทางเคมี	กากมันหมักยีสต์	กากมันสด
ความชื้น (w.b.)	79.1	70.3
โปรตีน (เปอร์เซ็นต์)*	16.4	2.8
พลังงาน (Mcal/kg)	2.5	2.8
เยื่อใยหยาบ (เปอร์เซ็นต์)	20.7	21.9

หมายเหตุ: *กรณีหมัก 10 20 30 วัน คุณค่าโปรตีนจะเพิ่มขึ้นประมาณ 12 16 20 เปอร์เซ็นต์
ที่มา: พิชาด เขจรศาสตร์ (2561)

ตารางที่ 2-6 ผลของการใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำกากส่าเหล้า ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต

ลักษณะที่ศึกษา	สูตรอาหาร					SE	P-value
	none	A	B	C	D		
น้ำหนักเริ่มต้น (kg)	15.87	15.92	15.88	15.98	15.91	0.339	0.999
น้ำหนักสุดท้าย (kg)	102.50	100.91	98.11	93.34	95.96	4.334	0.848
ADG (kg/day)	0.74	0.73	0.71	0.71	0.69	0.022	0.073

หมายเหตุ: none = ไม่ใช้, A = (15:3), B= (15:6), C= (30:3), D= (30:6) (กากมัน,น้ำกากส่าเหล้า)

2.6.4 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารโคเนื้อ

ใช้กากมันสำปะหลังหมักยีสต์ ในการทำอาหารสัตว์ทดแทนสำหรับโคเนื้อ โดยทดลองแบบ 2 x 2 ในอัตราส่วน20:40:40 (หญ้าหมัก:อาหารข้น:กากมันสำปะหลังหมักยีสต์) โดยมีทรีทเมนต์ที่ต้องการศึกษา ดังนี้

- ทรีทเมนต์ที่ 1 กากมันสำปะหลังหมัก+ยีสต์ ร่วมกับอาหารข้นระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์
- ทรีทเมนต์ที่ 2 กากมันสำปะหลังหมัก+ยีสต์ ร่วมกับอาหารข้นระดับโปรตีน 18 เปอร์เซ็นต์
- ทรีทเมนต์ที่ 3 กากมันสำปะหลังหมัก+พด.6 ร่วมกับอาหารข้นระดับโปรตีน16 เปอร์เซ็นต์
- ทรีทเมนต์ที่ 4 กากมันสำปะหลังหมัก+พด.6 ร่วมกับอาหารข้นระดับโปรตีน18 เปอร์เซ็นต์

ทดลองกับโคเนื้อ จำนวน 4 ตัว อายุ 2-4 ปี (ฐิติมา และคณะ, 2561)

(Pilajun and Wanapat, 2015) ได้ทำการศึกษาการใช้กากมันสำปะหลังหมักยีสต์กับโคเนื้อสายพันธุ์ลูกผสมพื้นเมือง กับโลว์ไลน์แองกัส เป็นอาหารแทนมันเส้นในสูตรอาหารทดแทนร้อยเปอร์เซ็นต์ ผลจากการวิจัยพบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังหมักยีสต์นั้นไม่ส่งผลต่อน้ำหนักตัวสุดท้าย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (ADG: Average Daily Growth) อีกทั้งยังไม่มีความแตกต่างกันในด้านสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 การเจริญเติบโตโคเนื้อที่เลี้ยงด้วยกากแป้งมันสำปะหลังหมักยีสต์ (FCSR) ใช้แทนมันเส้น

ลักษณะที่ศึกษา	กลุ่มควบคุม	กลุ่มทดสอบ	SE	P value
น้ำหนักเริ่มต้น (kg)	165.2	153.2	17	0.316
น้ำหนักตัวสุดท้าย (kg)	244.5	240.5	9.57	0.785
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (kg)	86.8	79.8	18.1	0.592
อัตราการเจริญเติบโต/ตัว/วัน ADG (kg/day)				
1-4 เดือน	0.31	0.38	0.08	0.155
4-7 เดือน	0.54	0.37	0.15	0.083
ค่าเฉลี่ย	0.41	0.38	0.08	0.544

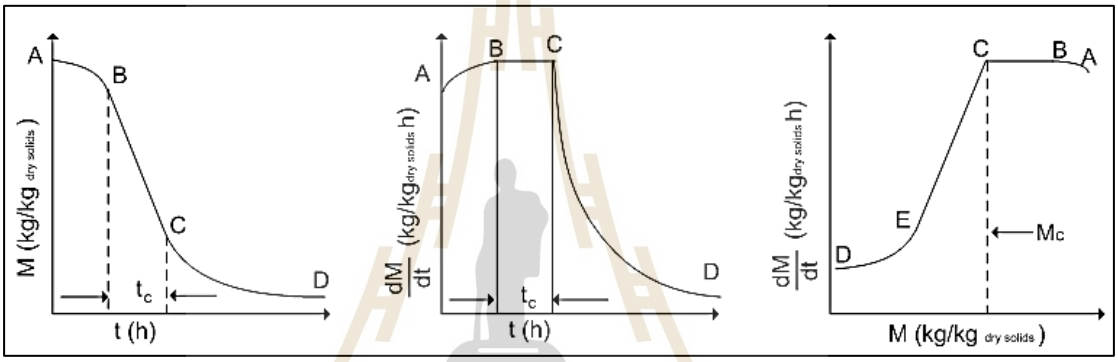
หมายเหตุ: กลุ่มควบคุม = ใช้มันเส้นในสูตรอาหารข้น ,กลุ่มทดสอบ = ใช้กากแป้งมันสำปะหลังหมักยีสต์ในสูตรอาหารข้น (สัดส่วน 35:65) ,SE=Standard Error ,P Value = Probability Value

ที่มา: Pilajun and Wanapat (2015)

2.7 ทฤษฎีการอบแห้ง

2.7.1 จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics)

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ปัจจัยที่มีความสำคัญ ต่อการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้งแสดงในรูปที่ 2.3 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ



รูปที่ 2.3 การลดลงของความชื้นวัสดุ
ที่มา: Brennan et al. (1990)

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุโดยความร้อนจากอากาศอบแห้งจะถ่ายเทเข้าสู่ผิววัสดุซึ่งความร้อนที่ให้กับวัสดุนี้จะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัส อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Period Of Drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในรูปที่ 2.4 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดย

ปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (CE) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (ED) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่นอัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยลงเมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่า ช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ ซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง คือ

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุ และเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่ววัสดุ ทำให้น้ำระเหยออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น จึงทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบาง ๆ เพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้นถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. ความดันของบรรยากาศการอบแห้ง โดยทั่วไปมักทำที่ความดันที่หนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่าย เนื่องจากความร้อนเครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้งเช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง (Vacuum Drum Drier) เป็นต้น

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะสภาพการนำความร้อน และการแผ่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

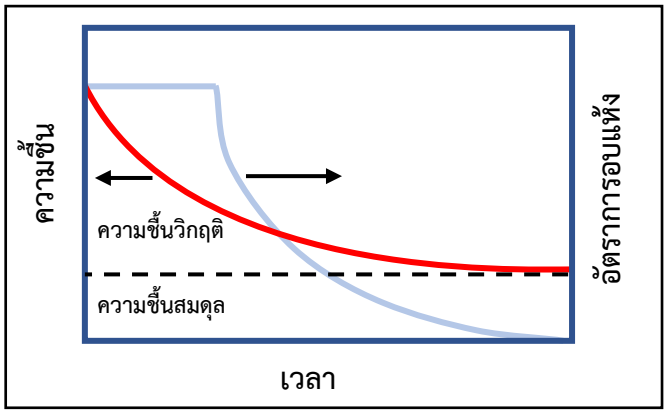
ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้ง คือสมบัติและประเภทของความชื้นวัสดุโดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบไปด้วยความชื้นรอบผิว (Boundary Moisture) และความชื้นในเนื้อวัสดุ (Absorbed Moisture) ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใด ๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความชื้นอากาศที่ใช้อบ โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีก แม้ว่า จะใช้เวลานานเท่าใดก็ตาม เราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)

อัตราการอบ (Drying Rate) เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถบอกให้เราทราบถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยเวลา
หน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อชั่วโมงหรือกิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงโดยปกติ ในการอบแห้งวัสดุหนึ่งๆ จะมีอัตราการอบแห้ง 2 ช่วง คือ

1. Constant Rate Drying คือ การอบแห้งในช่วงที่มีอัตราการระเหยน้ำเป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นเหลือเฟือความชื้นจึงเดินทางมาสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่จ่ายจากลมร้อนมาที่ผิว ส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นรอบผิว (Boundary Moisture) หรือความชื้นอิสระ (Unbound Moisture)

2. Falling Rate Drying (R_f) คือการอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลงเมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทัน อัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลดในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อยๆ เพิ่มขึ้นและค่า R_f อาจจะแปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ บางประเภทอาจมีแต่ Falling Rate ตลอดการอบเลยก็ได้ ทั้งนี้การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงถึงจุดสภาวะความชื้นสมดุล

วัสดุจากสิ่งมีชีวิต ส่วนใหญ่จะมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนเมื่อนำไปทำแห้งในลักษณะชั้นบาง ที่สภาวะคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมร้อน) อัตราการอบแห้งจะคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง แล้วจะเริ่มลดลงขณะที่อัตราการอบแห้งเริ่มเปลี่ยนจากคงที่เป็นลดลงเรียกว่าความชื้นจุดวิกฤตในเมล็ดพืช ส่วนใหญ่จะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการถ่ายเทมวลจึงถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลจากภายในไปยังผิววัสดุ ในระยะแรกของการอบแห้งการเคลื่อนที่ของน้ำจะเคลื่อนที่ในรูปของเหลวเนื่องจากวัสดุยังมีความชื้นสูงแต่เมื่อความชื้นลดลงมากการเคลื่อนที่ของน้ำจะเคลื่อนที่ในรูปแบบของไอน้ำ จากลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำดังกล่าวแสดงว่าความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การอบแห้งวัสดุจากสิ่งมีชีวิต ในช่วงอัตราการอบแห้ง ลดลงและคงที่
ที่มา: สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

สามารถหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) หรืออัตราส่วนของมวลน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อหนึ่งหน่วยเวลาอบแห้งได้ดังสมการต่อไปนี้

$$DR = \frac{(m_{p,i} - m_{p,f})}{t} \qquad (2.1)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/hr)

$m_{p,i}$ คือ น้ำหนักก่อนอบแห้ง (kg)

$m_{p,f}$ คือ น้ำหนักหลังอบแห้ง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

2.7.2 การหาค่าความชื้นของอาหาร และวัสดุทางการเกษตร

ในกรณีของวัสดุทางการเกษตรซึ่งส่วนใหญ่มีความชื้นค่อนข้างสูงทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวส่งผลให้ไม่สามารถเก็บรักษาผลิตผลที่ได้เป็นระยะเวลานาน เพราะผลิตผลอาจจะเกิดการเน่าบูดจากเชื้อราต่าง ๆ ที่เกิดจากความชื้น การอบแห้งจึงเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลที่ได้เป็นระยะเวลานานขึ้น นอกจากนั้นสามารถนำกระบวนการอบแห้งไปประยุกต์ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้

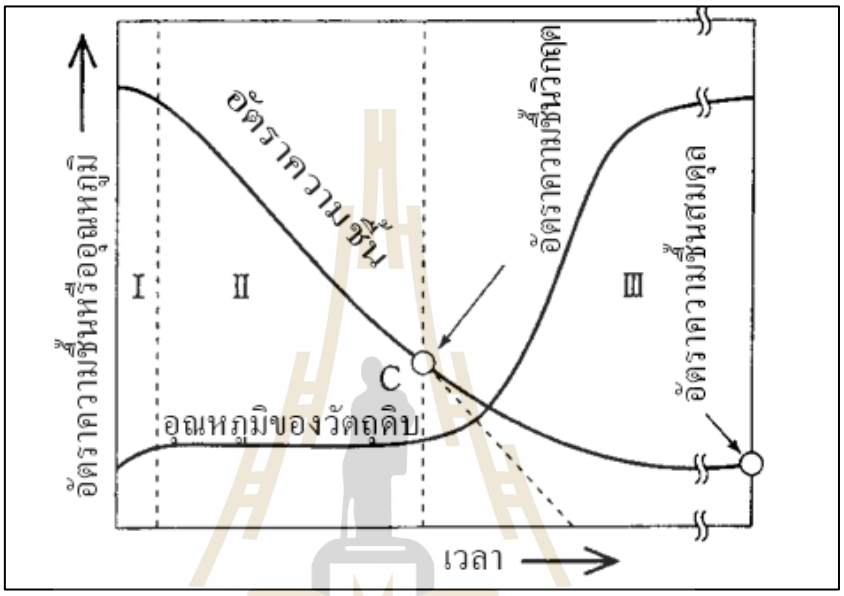
(วิวัฒน์, 2529) ได้แบ่งลักษณะการอบแห้งเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.5 ได้แก่

1. เป็นการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ โดยจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความชื้นของวัสดุจะเริ่มลดลงในขณะเดียวกันอุณหภูมิของวัสดุค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงนี้จะเกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ หลังจากนั้นจะเกิดช่วงที่

2. อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในลักษณะเป็นเส้นตรงและเราจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลานี้อุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากวัสดุยังสามารถคายความชื้นออก เราเรียก

ช่วงนี้ว่า ช่วงการอบแห้งที่มีอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในวัสดุลดลงอุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นทำให้เกิดอัตราส่วนความชื้นลดลงที่จุดนี้เราเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต หลังจากนั้นขบวนการอบแห้งก็จะเข้าสู่ช่วงที่

3. อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแต่อัตราส่วนความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นสมดุล เราเรียกช่วงนี้ว่าการอบแห้งที่มีการอบแห้งลดลง



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง
ที่มา: วิวัฒน์ (2529)

ซึ่งการอบแห้งจะมีกระบวนการถ่ายเทเกิดขึ้นคือ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไปยังผิวหน้าของวัสดุ และ การถ่ายเทมวลจากข้างในไปยังผิวของวัสดุเนื่องมาจากการถ่ายเทความชื้นสู่สิ่งแวดล้อม รูปที่ 2.6 พลังงานถ่ายเทสู่วัสดุอบแห้งโดย

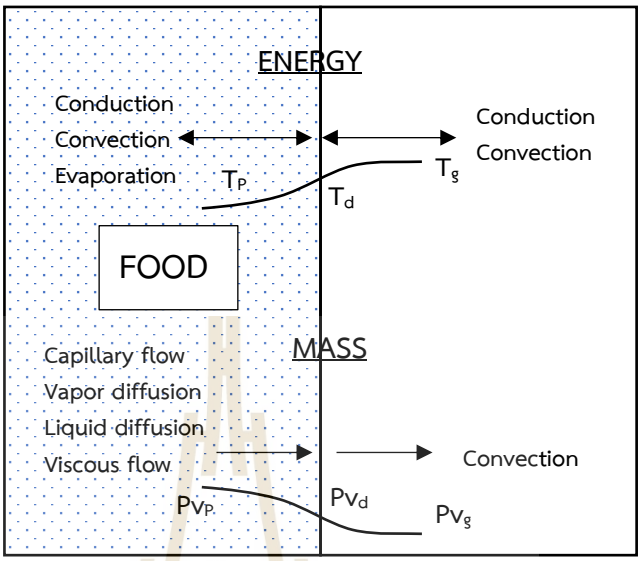
1. การพาความร้อน เกิดขึ้นเมื่อพลังงานสำหรับการระเหยได้รับจากกระแสอากาศร้อนที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น การอบแห้งแบบถาด, belt-conveyor, flash, fluid-bed และ spray drying

2. การนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์สัมผัสกับผิวร้อนดัง อาทิเช่น ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหรือ rotary dryer

การส่งผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นโดยการนำ เนื่องจาก internal gradient ของอุณหภูมิและมีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการพา เนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นของผลิตภัณฑ์อาจเกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายเทที่ต่างกันได้แก่

1. Capillary flow เนื่องจาก gradients ของ capillary suction pressure
2. การแพร่กระจายของเหลวเนื่องจาก gradient ของความเข้มข้น
3. การแพร่กระจายของไอน้ำเนื่องจาก partial vapor-pressure gradients

4. Viscous flow เนื่องจาก total pressure gradient ซึ่งมีสาเหตุมาจากความดันภายนอกหรืออุณหภูมิที่สูง



รูปที่ 2.6 Schematic of the food drying phenomenon
ที่มา: Guillermo et al. (1997)

การถ่ายเทมวลจากผลิตภัณฑ์ไปสู่สิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการพาความร้อนเนื่องด้วยความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและผลิตภัณฑ์เกิดการระเหยโดยตรงเมื่อความดันไอน้ำในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ อาทิเช่นในกรณีนี้ของ vacuum drying และ freeze drying

โดยการอบแห้งแบบการพาความร้อน สำหรับสภาวะ heat flux q_c และอัตราการระเหย n_w จะอยู่ในรูปของ

$$\text{Heat transfer } q_c = h_g(T_{sf}-T_g) \tag{2.2}$$

$$\text{Mass transfer } n_w = k_g(P_{vsf}-P_{vg}) \tag{2.3}$$

โดยที่ h_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
k_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
T_{sf} คือ อุณหภูมิพื้นผิวผลิตภัณฑ์
T_g คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง
P_{vsf} คือ water vapor partial pressure of surface
P_{vg} คือ water vapor partial pressure of air

ความชื้นในวัสดุ (moisture content) เป็นดัชนีที่ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือมวลของวัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้สองรูปแบบ กล่าวคือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis moisture content) และความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis moisture content) โดยความชื้นทั้งสองรูปแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ

$$M_d = \frac{w-d}{d} \tag{2.4}$$

$$M_w = \frac{w-d}{w} \tag{2.5}$$

โดยที่ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.)

W คือ มวลของวัสดุ (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด) (kg)

ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) หมายถึง ปริมาณความชื้นของวัสดุที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมภายนอก วัสดุชื้นจะไม่มีการดูดและคายความชื้นจากอากาศโดยรอบจึงมีอัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ มีค่าความชื้นคงที่ ความชื้นจะไม่ลดลงอีก ภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ถ้าต้องการให้ความชื้นลดลงจากนี้ต้องเปลี่ยนสภาวะการอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ เช่น ลดขนาด

$$M_{eq} = \frac{w-d}{w_b} \tag{2.6}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยที่ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (w.b.)

W คือ มวลสุดท้ายของวัสดุจากเครื่องอบแห้ง (kg)

W_b คือ มวลก่อนทำการอบแห้ง (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปที่เวลาใด ๆ

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_w - M_{eq}} \quad (2.7)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (w.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (w.b.)

M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใด ๆ (w.b.)

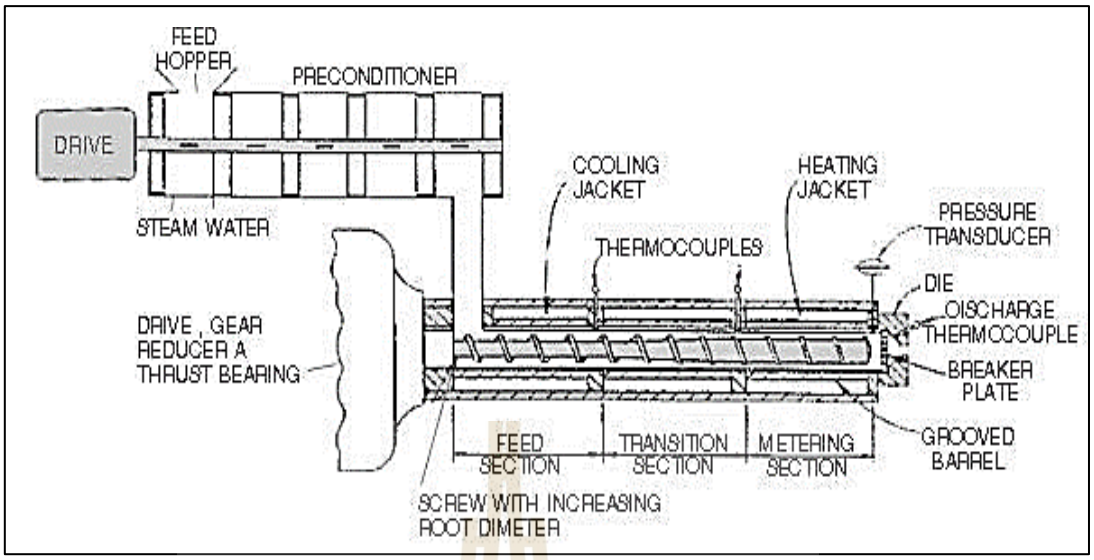
M_w คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (w.b.)

เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาความชื้นโดยการอบ อาจสังเกตได้จากน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนไป หากพบว่าน้ำหนักของวัสดุยังมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อครบเวลาอบที่กำหนดไว้ แสดงว่าความชื้นในอาหารยังถูกกำจัดออกไปได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรอบต่อไปจนกระทั่งน้ำหนักวัสดุที่อบนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงการหาความชื้นของอาหารบางชนิดสามารถหารายละเอียดอ้างอิงเพิ่มเติมได้จากมาตรฐานของ Association of Official Agricultural Chemists (AOAC, 2000)

2.8 เครื่องอบแห้ง

2.8.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูชั่น

เอ็กซ์ทรูชั่น หรือการรีดน้ำผ่านเกลียวเป็นกระบวนการที่ผสมผสานกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลายเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การต้ม การนวด และขึ้นรูป โดยหลักการของเครื่องเอกซ์ทรูชั่นคือการเค้นหรือนวดวัสดุด้วยเกลียวอัด (Screw Conveyer) ออกมาผ่านหน้าแปลน (Die) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นแท่งหรือเป็นเม็ด ซึ่งอาจมีการให้ความร้อนในระหว่างการอัดด้วย วิธีการเอ็กซ์ทรูชั่นดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอัตราการผลิตสูง และสามารถลดค่า Water Activity ได้เป็นต้น โดยปัจจัยที่สำคัญของการใช้วิธีการเอ็กซ์ทรูชั่น คือ สภาวะการทำงานของเครื่องและคุณสมบัติของวัสดุ โดยปัจจัยในด้านสภาวะการทำงานของเครื่องประกอบไปด้วย อุณหภูมิ ความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าแปลน (Die Aperture) และอัตราการเฉือน ส่วนปัจจัยสำคัญในด้านคุณสมบัติของวัสดุได้แก่ ความชื้น ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder)

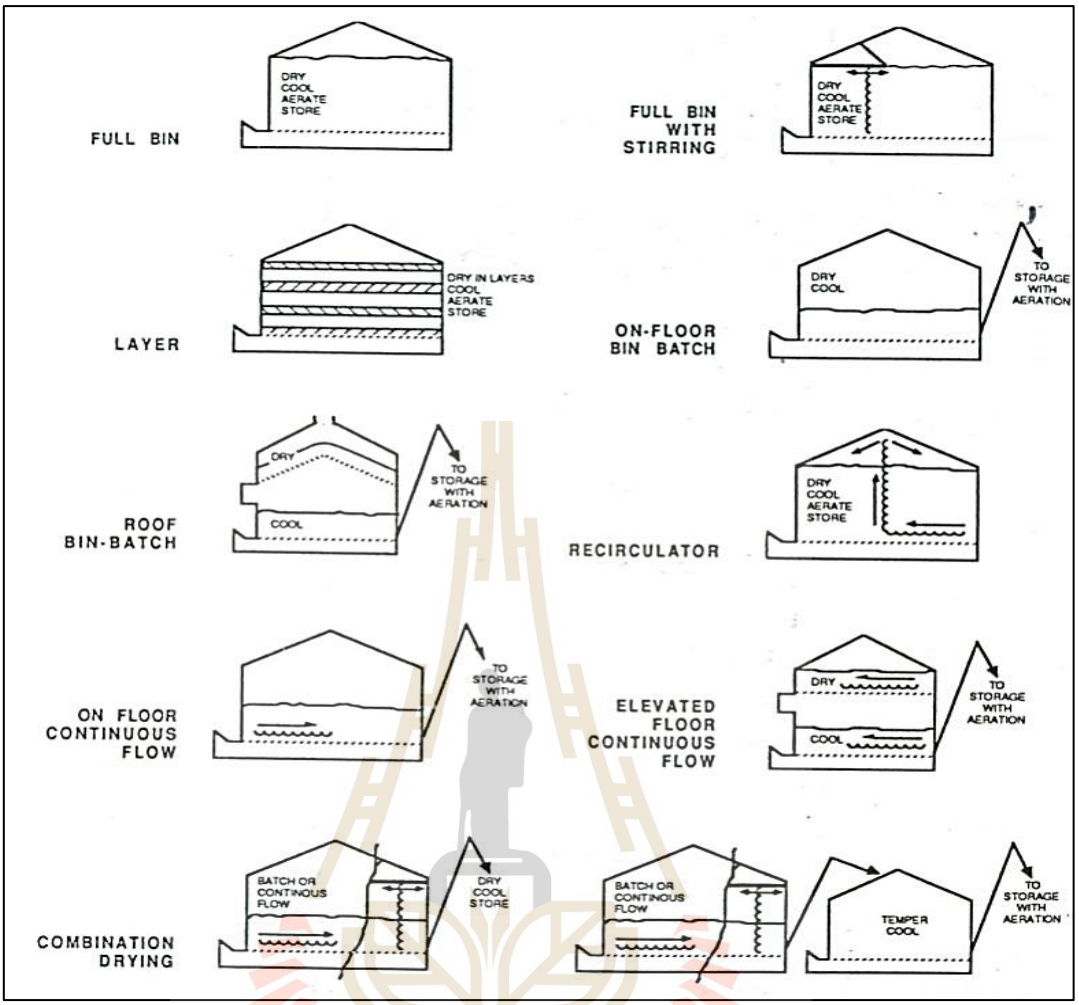


รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder)
ที่มา: Brooker et al. (1992)

2.8.2 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

การอบแห้งเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการถนอมรักษาผลิตผลทางการเกษตรและอาหาร เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในผลิตผลทางการเกษตรและอาหารมีน้อยหากมีความชื้นต่ำ เป็นผลให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรและอาหารได้เป็นเวลานานโดยไม่เน่าเสีย การอบแห้งนอกจากช่วยถนอมรักษาวัสดุเกษตร และอาหารแล้วยังสามารถลดปริมาตรและน้ำหนักของผลิตผลทางการเกษตรและอาหารหลังการอบแห้ง ทำให้ใช้เนื้อที่ในการเก็บรักษาน้อยและการขนส่งมีประสิทธิภาพสูง

เครื่องอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลักคือ เครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบไหล (moving-bed dryer) ซึ่งแต่ละชนิดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก ข้อดีข้อเสียก็แตกต่างกันออกไป (เทวรัตน์ ตรีอานรรค, 2556)

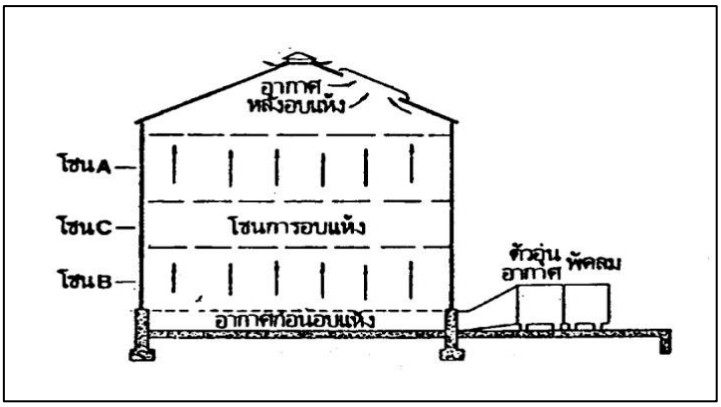


รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชนิดถังเก็บแบบต่าง ๆ

ที่มา: Brooker et al. (1992)

1. เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบอยู่กับที่

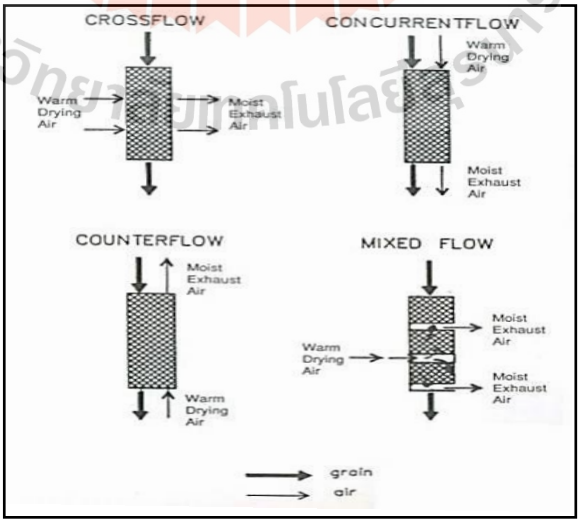
เครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ แบบถังเก็บ (in-bin drying) แบบเป็นชั้น (layer drying) และแบบเป็นงวด (batch-in-bin drying) ในเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ อัตราการไหลของอากาศค่อนข้างต่ำ อย่างเช่นในกรณีของการอบแห้งแบบถังเก็บ จะสามารถแบ่งชั้นเมล็ดพืชออกเป็น 3 โซน ดังรูปที่ 2.9 คือ โซน A อยู่ชั้นบนสุด โซน B อยู่ชั้นล่างสุด และโซน C อยู่ระหว่างโซน A และโซน B จากภาพจะเห็นว่ากระแสอากาศไหลผ่านโซน B, C และA ตามลำดับ ที่โซน A เมล็ดพืชและอากาศอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนและความชื้น เมล็ดพืชมีความชื้นเท่ากับความชื้นเริ่มต้น และอากาศอบแห้งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่โซน B เมล็ดพืช มีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุลที่สภาวะอากาศตรงทางเข้าเครื่องอบแห้ง ที่โซน C เมล็ดพืชและอากาศไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุล มีการถ่ายเทความร้อนและความชื้นซึ่งกันและกัน เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ความหนาของโซน B จะมากขึ้น และความหนาของโซน A จะลดลง เมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง โซน C จะหายไป และจะเหลือเพียงโซน B เท่านั้น



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของโซนการอบแห้ง
ที่มา: สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

2. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล

เครื่องอบแห้งแบบไหลต่างกับเครื่องอบแห้งแบบอยู่กับที่ตรงที่เมล็ดพืชมีการไหลในขณะทำการอบแห้ง โดยทั่วไปเมล็ดพืชจะไหลลงสู่ที่ต่ำตามแรงโน้มถ่วงอัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหล ซึ่งอาจใช้คนปรับโดยดูจากความชื้นของเมล็ดพืชเป็นช่วง ๆ หรืออาจควบคุมโดยอัตโนมัติโดยใช้เทอร์โมสแตทเป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหล เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำมีน้อย หรืออาจใช้เครื่องวัดความชื้น ซึ่งอาจวัดได้ถูกต้องดีแต่ราคาจะแพงกว่ามากเครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 4 แบบคือ แบบไหลขวาง (cross-flow dryer) แบบไหลตาม (concurrent-flow dryer) แบบไหลสวนทาง (counter-flow dryer) และแบบผสม (mixed flow) ตามทิศทางการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งอีกทั้ง 2 แบบนี้ยังเหมาะกับงานในระดับกลางและใหญ่ เพราะใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและอากาศอบแห้ง
ที่มา: Brooker et al. (1992)

2.8.3 เครื่องอบแห้งอาหาร และวัสดุเกษตรอื่น

สำหรับเครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรอื่น ๆ นั้นมีเทคนิคในการอบแห้งหลายแบบทั้งนี้ในการเลือกใช้ควรดูให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการนำมาอบแห้ง

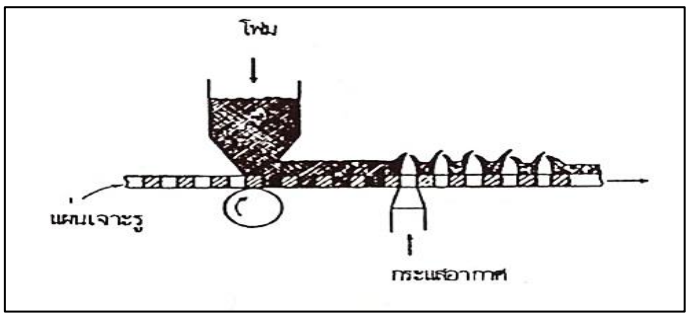
1. เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ (fixed-tray dryer)

เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่เหมาะกับอาหารที่อยู่ในรูปของของแข็งที่ไม่สามารถอบแห้งแบบกองรวมกันเป็นปริมาณมาก (bulk drying) เครื่องอบแห้งแบบนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (tunnel dryer) และเครื่องอบแห้งแบบตู้ (cabinet dryer) ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งเรียงอยู่บนถาดซึ่งวางซ้อนกันโดยมีช่องว่างของอากาศระหว่างถาด ถาดดังกล่าวมีขนาดประมาณ 1 เมตร × 1 เมตร และวางอยู่บนรถเข็นซึ่งสูงประมาณ 1-1.5 เมตร เพื่อให้คนจับและยกถาดได้สะดวก

2. เครื่องอบแห้งแบบชั้นอบแห้งเคลื่อนที่ (moving-bed dryer)

ตัวอย่างอันหนึ่งของเครื่องอบแห้งแบบนี้คือ การอบแห้งโดยใช้สายพาน ชั้นของวัสดุที่ต้องการอบแห้งอยู่บนสายพานซึ่งเคลื่อนที่และมีรูให้อากาศไหลผ่านได้ อากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีทิศทางไปด้านบนหรือด้านล่างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุอบแห้ง ในบางครั้งอาจมีการกลับทิศทางลมร้อนเป็นช่วงเวลาเพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างทั่วถึง สภาวะของอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของสายพาน เช่นส่วนต้นของสายพานวัสดุอบแห้งยังมีความชื้นสูงอยู่ก็ใช้ลมร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูง ส่วนตอนปลายของสายพานก็ใช้ลมร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเพราะวัสดุอบแห้งมีความชื้นลดลงใกล้ถึงจุดที่ต้องการแล้ว การอบแห้งแบบสายพานนี้มีข้อเสียที่ว่าไม่สามารถอบแห้งวัสดุให้มีความชื้นต่ำกว่า 10 w.b. ได้โดยประหยัด โดยทั่วไปเมื่อวัสดุมีความชื้นเหลือประมาณ 27 w.b. หรือต่ำกว่าก็จะถูกถ่ายไปยังเครื่องอบแห้งตัวที่สอง เช่น เครื่องอบแห้งแบบถังหรือถังเก็บเพื่อลดความชื้นต่อไป

เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้กับวัสดุในรูปของเหลว ซึ่งได้มีการทำให้คงตัวในรูปของโฟมโดยการอัดอากาศหรือก๊าซอื่นและใส่สารเพิ่มเติมบางอย่าง โดยป้อนเข้าสายพานซึ่งมีรูแล้วผ่านลมร้อนไปตามรูเหล่านั้นดังรูปที่ 2.11 ชั้นของโฟมโดยทั่วไปมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยวิธีนี้จะมีโครงสร้างโปร่งพรุน สามารถนำกลับเพื่อไปผสมกับน้ำเพื่อให้กลับคืนรูปได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเหมาะกับพวกน้ำผลไม้แห้งเป็นต้น นอกจากผลิตภัณฑ์พวกโฟมแล้ว เครื่องอบแห้งแบบสายพานยังใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ด้วย



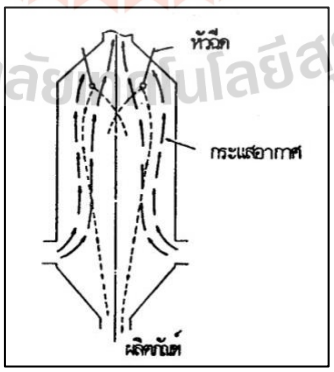
รูปที่ 2.11 เครื่องอบแห้งแบบสายพาน โดยมีผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของโฟม
ที่มา: สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

3. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

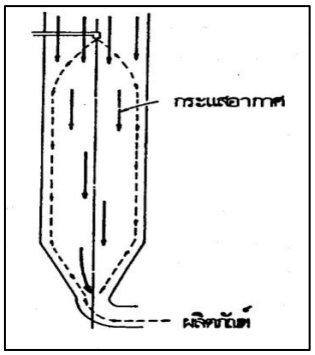
เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเหมาะสำหรับวัสดุซึ่งอยู่ในรูปของเหลว เมื่ออบแห้งแล้วผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปของแข็งเม็ดเล็ก ๆ เช่น นมผง ไข่ผง กาแฟ เป็นต้น เนื่องจากช่วงเวลาในการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสั้นมาก อาจจะประมาณ 3 ถึง 10 วินาที ดังนั้นจึงเหมาะกับอาหารซึ่งมีคุณภาพสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นมากเป็นผลมาจากการทำให้อาหารเหลวเป็นละอองโดยใช้เครื่องทำละออง (atomizer) ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนมาก เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบไหลสวนทางและแบบไหล ตามรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางคือการใช้ความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อเสียคือคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งอาจจะไม่ดี เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนที่แห้งแล้วจะสัมผัสกับอากาศซึ่งร้อนจัด นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศต้องไม่สูงมากนัก เพื่อป้องกันการพัดพาเอาอาหารซึ่งแห้งแล้วออกจากเครื่องอบแห้ง

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลตามกันมีข้อดีตรงที่ว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งสูง แต่การใช้ประโยชน์ของลมร้อนอาจไม่ค่อยมีประสิทธิภาพมากนัก ในเครื่องอบแห้งแบบไหลตามความเร็วลมจะมีค่าระหว่าง 2 ถึง 3 เมตรต่อวินาที

เครื่องทำละอองทำหน้าที่ผลิตหยดของเหลวเล็ก ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ แบบหัวฉีดความดัน (pressure nozzles) แบบของไหลสองชนิด (two-fluid atomizers) และแบบจานหมุน (rotary atomizers) เครื่องทำละอองแบบหัวฉีดความดันทำงานโดยอาศัยความดันสูงอัดของเหลวให้ผ่านรูเล็ก ๆ ส่วนแบบของไหลสองชนิดทำงานโดยอาศัยกระแสอากาศความเร็วสูงวิ่งเข้ากระทบของเหลว ทำให้ของเหลวแตกกระจายออกเป็นหยดเล็ก ๆ ส่วนแบบจานหมุนทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงซึ่งเกิดจากจานหมุนความเร็วสูงทำให้ของเหลวเหวี่ยงกระจายออกไปเป็นหยดเล็ก ๆ จำนวนมาก แบบจานหมุนมีข้อดี คือสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่อาจอุดตันในกรณีของหัวฉีดความดัน หน้าที่อีกอย่างหนึ่งของเครื่องทำละอองคือเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เหลว



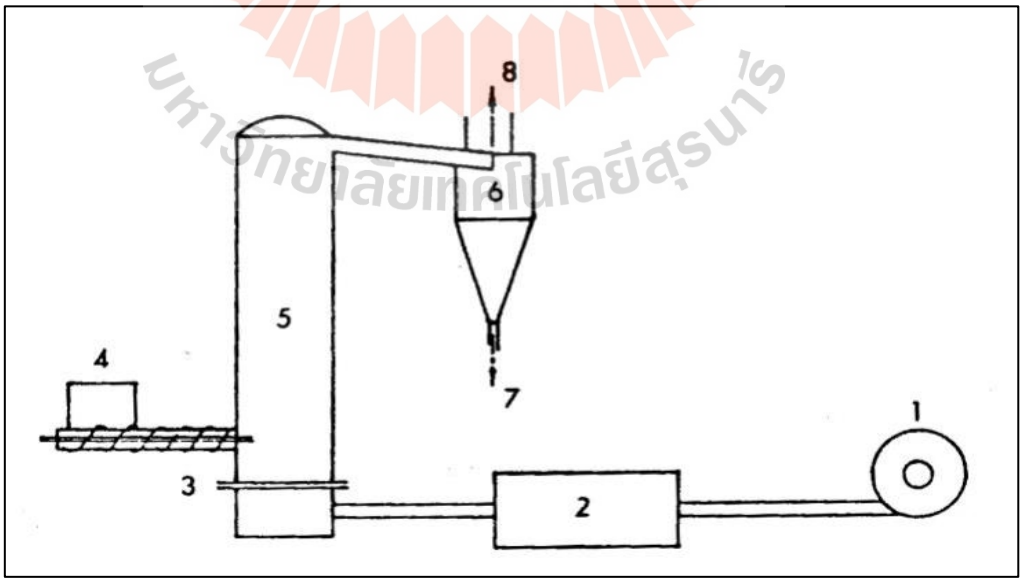
รูปที่ 2.12 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบไหลสวนทาง
ที่มา: สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)



รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบไหลตาม
ที่มา: สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

4. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized bed dryer)

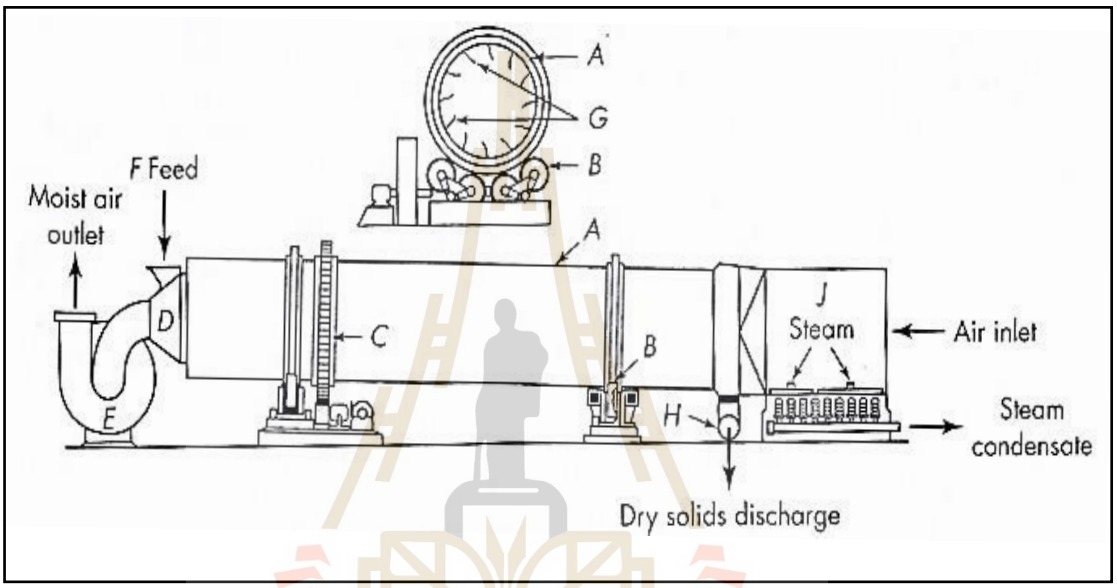
เครื่องอบแห้งแบบนี้วัสดุอบแห้งอยู่ในลักษณะของแข็งชิ้นเล็ก ๆ ลมร้อนถูกเป่าด้วยความเร็วสูงพอที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของวัสดุ และทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในอากาศได้ ทำให้มีคุณลักษณะเหมือนของไหล ความเร็วลมที่นิยมใช้กันอยู่ในช่วง 100-200 เมตรต่อนาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ขนาดและรูปทรงของวัสดุ รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ซึ่งพัดลม (1) เป่าอากาศผ่านตัวทำอากาศร้อน (2) และไหลผ่านแผ่นตะแกรง (3) วัสดุไหลเข้าเครื่องโดยเกลียวลำเลียง (4) และปะทะกับกระแสอากาศทำให้แขวนลอยอยู่ในห้องอบแห้ง (5) วัสดุที่แห้งแล้วจะเบาขึ้น ทำให้ลอยได้สูงขึ้น และไหลไปที่เครื่องแยกคัดแบบไซโคลน (6) โดยอากาศชื้นออกทางด้านบน (8) และวัสดุที่แห้งแล้วถูกรวบรวมที่ (7)



รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด
ที่มา: สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540)

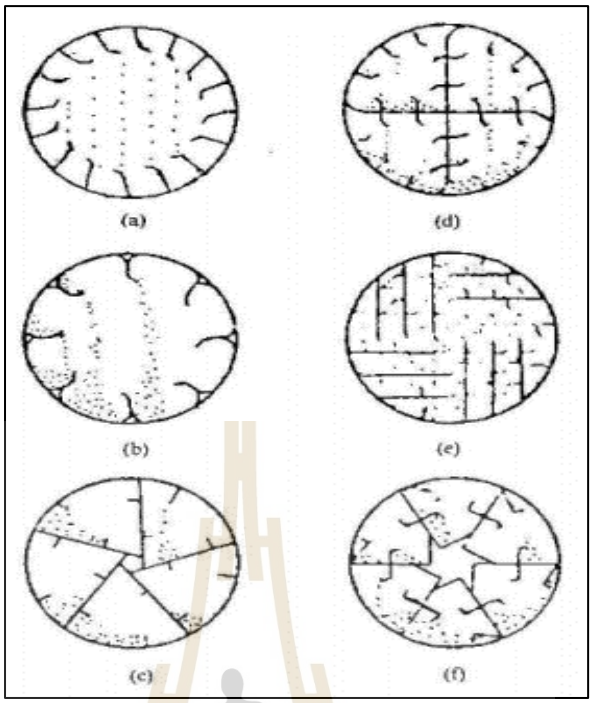
5. เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลายชนิดแต่นิยมใช้สำหรับอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีลักษณะเป็นแบบช่องเดียวที่รับสัมผัสความร้อนโดยตรง ดังรูปที่ 2.15 โดยหลักการทำงานจะใช้ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุอบแห้งโดยตรงภายในตัวถังที่หมุน เพื่อแบ่งกระจายวัสดุอบแห้งให้ทั่วผนังทรงกระบอก และทำให้วัสดุอบแห้งผ่านกระแสอากาศร้อนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุอบแห้งกับกระแสมวลอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการไล่ความชื้น ท่อลมร้อนจะต่อตรงเข้าไปในเครื่องอบแห้งโดยตรง และอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งเตาเผาหรือเครื่องทำความร้อน



รูปที่ 2.15 เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว
ที่มา: Brooker et al. (1992)

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ ตัวจะหมุนวางเอียงกับแนวระนาบเล็กน้อย เพื่อขับให้วัสดุอบแห้งเคลื่อนที่จากที่สูงปากอุโมงค์ไปยังที่ต่ำปลายอุโมงค์ทรงกระบอกภายในตัวอุโมงค์จะมีคลีบรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.16 ทำหน้าที่ตักและผลักวัสดุอบแห้งลงมาตามแรงโน้มถ่วงให้เคลื่อนที่ไปยังทิศทางเดียวกัน ขณะเดียวกันลมร้อนจะไหลเข้ามาไล่ความชื้นที่อยู่ในวัสดุอบแห้งในขณะที่เคลื่อนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และไล่ความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว(สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)



รูปที่ 2.16 รูปแบบของคลีบแบบต่าง ๆ (Flights and Lifters of Rotary Drum)
ที่มา: Brooker et al. (1992)

ลักษณะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่มีลักษณะผสมกันระหว่างเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว (Flash Dryer) คือส่วนที่วัสดุอบแห้งแขวนลอยอยู่ในอากาศ เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray Dryer) คือส่วนที่ไม่ถูกคลีบตักขึ้นไปเวลาที่วัสดุอบแห้งอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง (Residence Time) โดยเครื่องอบแห้งแบบหมุนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 นาที ถึง 2 ชั่วโมง โดยเครื่องอบแห้งจะสามารถรับวัสดุอบแห้งได้ประมาณ 5 -15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรถังทรงกระบอก

โดยลักษณะการไหลของมวลอากาศร้อนนั้นสามารถแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่ 1.การไหลแบบตาม (Co-current Flow) โดยวัสดุและอากาศจะไหลไปในทิศทางเดียวกัน 2.แบบไหลสวนทาง (Counter-current Flow) อากาศจะไหลสวนทิศกับการไหลของวัสดุอบแห้ง การเลือกใช้ลักษณะการไหลของอากาศแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของวัสดุอบแห้งนั้น ๆ หากวัสดุอบแห้งไวต่อความเสียหายจากความร้อนมากควรจะเลือกใช้การไหลแบบตาม แต่หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในเชิงความร้อนการอบแห้งแบบไหลสวนทาง จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า

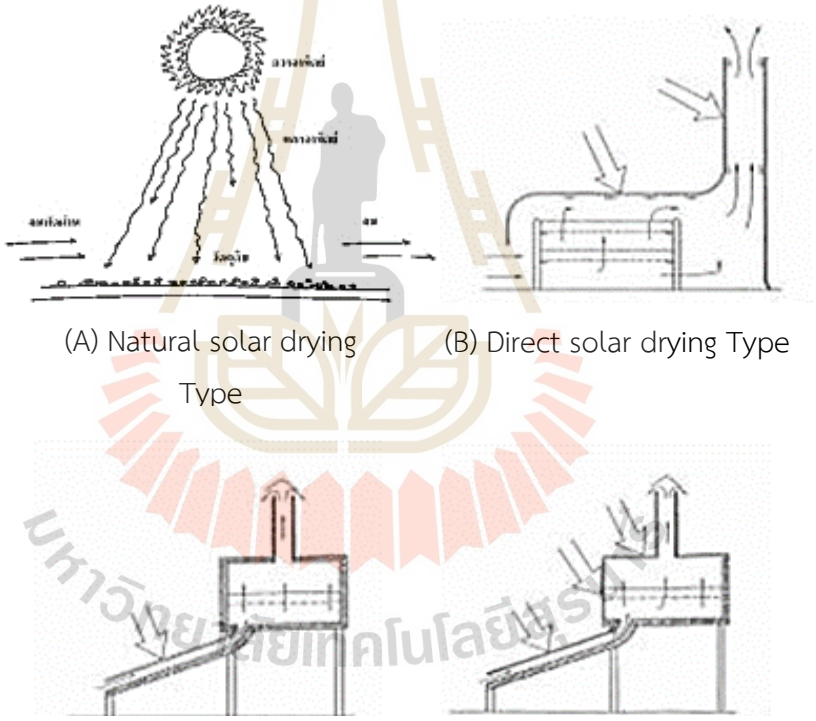
การไหลแบบตาม (Co-current Flow) อากาศร้อนทางเข้าจะสัมผัส กับ วัสดุอบแห้งที่เปียก ดั้งนั้นอุณหภูมิของวัสดุยังคงอยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาสซึ่งเป็นระยะเวลาที่วัสดุยังมีความชื้นสูงอยู่และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นของวัสดุจะเริ่มลดลง

การไหลแบบสวนทาง (Counter-current Flow) วัสดุที่อบแห้งจะสัมผัสกับอากาศร้อนที่ทางออก การไหลแบบนี้จะมีประโยชน์ถ้าต้องการให้วัสดุอบแห้งมีอุณหภูมิสูง แต่จะต้องไม่สูงเกินไปที่จะทำให้วัสดุแห้งเปลี่ยนคุณสมบัติ

2.8.4 เครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์

เป็นการใช้พลังแสงอาทิตย์ในการไล่ความชื้นของวัสดุ โดยพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยของทุกพื้นที่มีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m^2 (หน่วยวิจัยพลังงาน แสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2559) ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังแสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ

1. เครื่องอบแห้งแบบไม่อาศัยตัวกลาง (Passive) โดยอาศัยแรงลมหมุนเวียนอากาศร้อนจากธรรมชาติ และพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยที่สามารถแยกย่อยได้ 4 ชนิดได้แก่ การรับรังสีอาทิตย์แบบธรรมชาติ (Natural solar drying Type) การรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Direct solar drying Type) การรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (Indirect solar drying Type) และการรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Mixed solar drying Type) ดังรูปที่ 2.17 (คู่มือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, 2559)

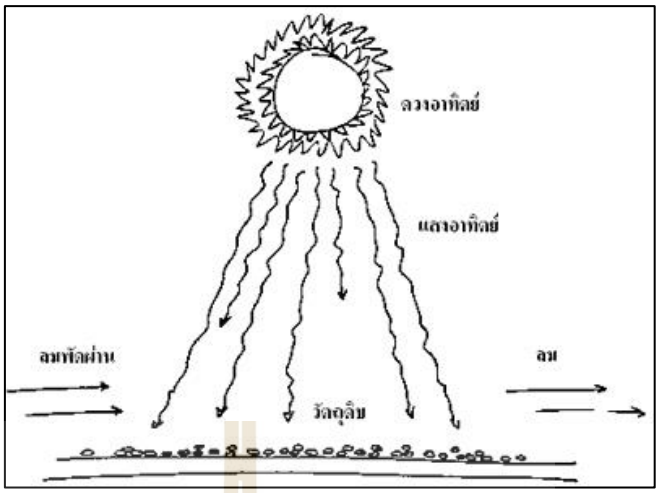


(A) Natural solar drying Type (B) Direct solar drying Type

(C) Indirect solar drying Type (D) Mixed solar drying Type

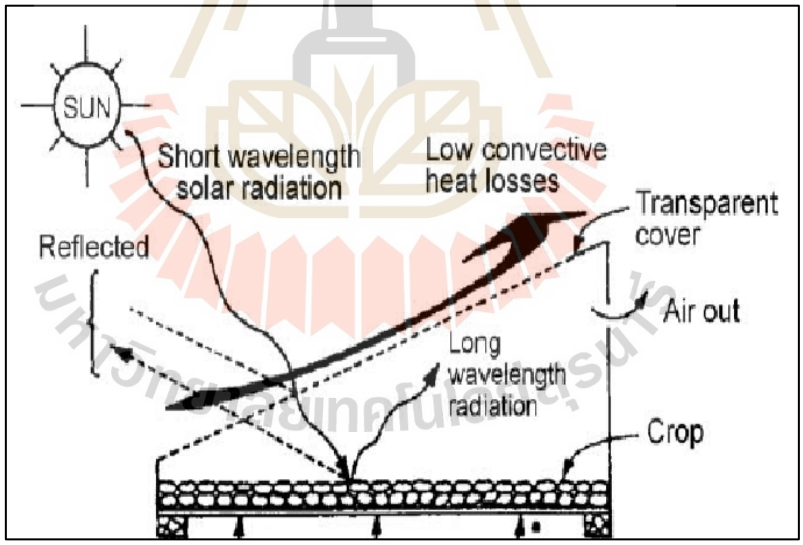
รูปที่ 2.17 เครื่องอบแห้งแบบไม่อาศัยตัวกลาง
ที่มา: คู่มือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (2559)

(A) การรับรังสีอาทิตย์แบบธรรมชาติ (Natural solar drying Type) เป็นการไล่ความชื้นโดยนำผลิตภัณฑ์หรือวัสดุรับพลังงานแสงอาทิตย์ ลมตามสภาพอากาศ และมลภาวะตามธรรมชาติโดยตรง รูปที่ 2.18 อาทิเช่นการบนลานตากปูน บนไม้ หรือบนภาชนะเป็นต้น



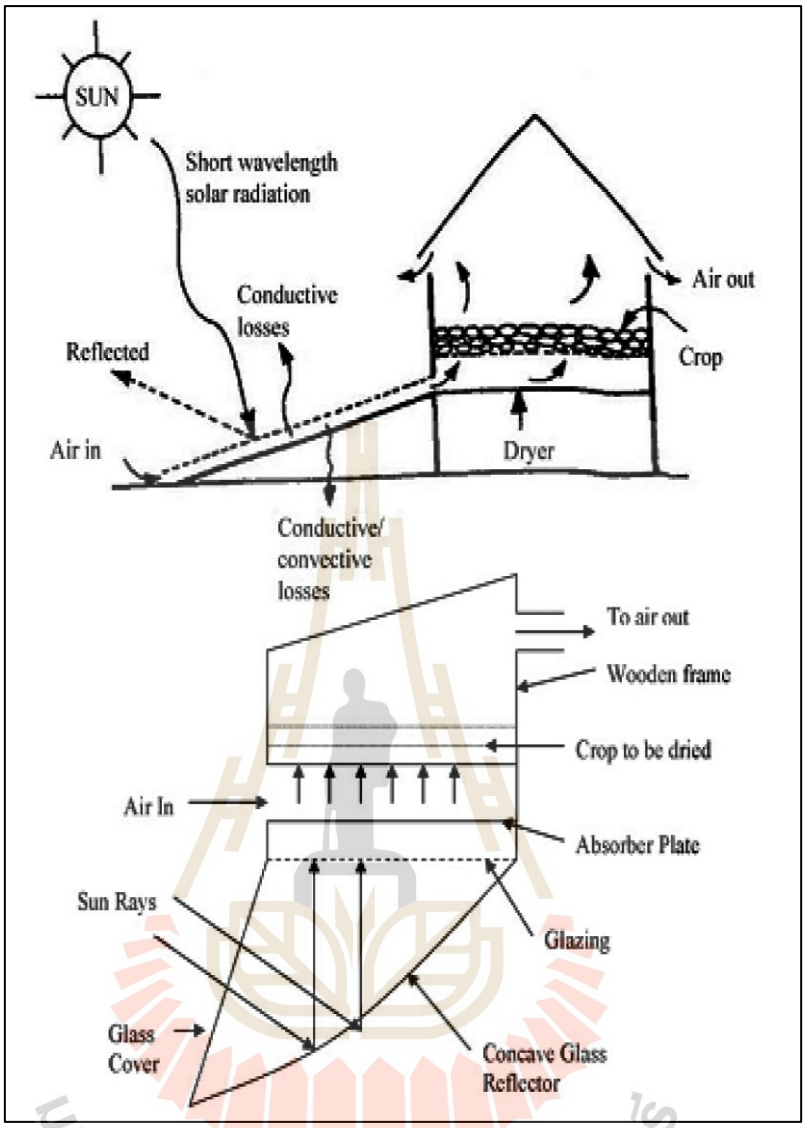
รูปที่ 2.18 การรับรังสีอาทิตย์แบบธรรมชาติ
ที่มา: คู่มือระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (2559)

(B) การรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (Direct solar drying Type) เป็นการไล่ความชื้นโดยนำผลิตภัณฑ์หรือวัสดุรับพลังงานแสงอาทิตย์ และลมจากธรรมชาติโดยตรง แต่มีการป้องกันการปนเปื้อนจากมลภาวะภายนอก รูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การรับรังสีอาทิตย์โดยตรง
ที่มา: Sharma et al. (2009)

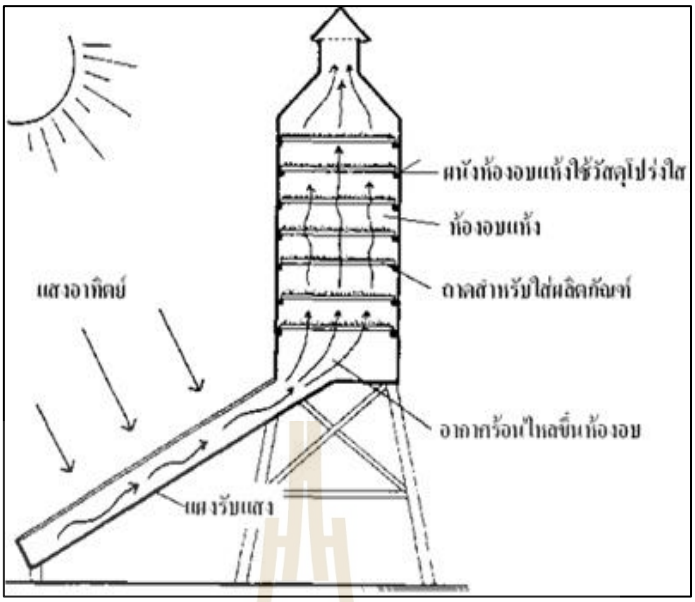
(C) การรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม (Indirect solar drying Type) เป็นการไล่ความชื้นโดยนำผลิตภัณฑ์หรือวัสดุรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม โดยการรับผ่านแผงรับความร้อน (Solar panel or Absorber panel) ซึ่งภายในจะมีวัสดุดูดกลืนความร้อนถ่ายเทไปยังอากาศ และเคลื่อนที่ไปยังห้องอบ รูปที่ 2.20 โดยการพาระหว่างอากาศร้อนและวัสดุเปียก บนพื้นฐานของความเข้มข้นของความชื้น ระหว่างอากาศที่ใช้อบแห้งกับความชื้นบนพื้นผิววัสดุเปียก



รูปที่ 2.20 การรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม

ที่มา: Sharma et al. (2009)

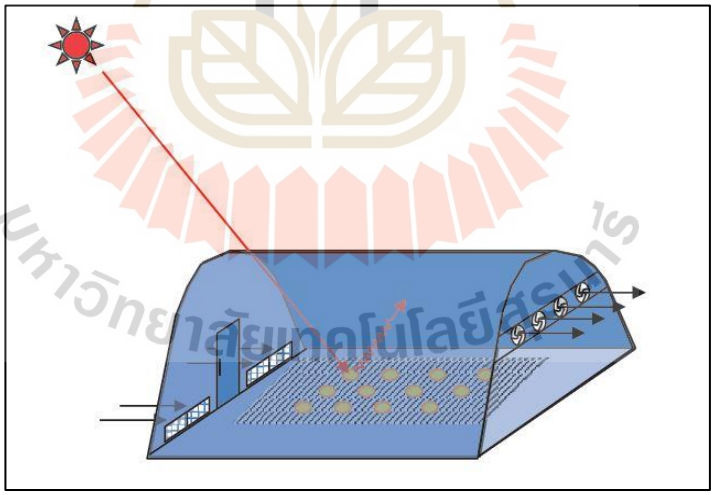
(D) การรับรังสีอาทิตย์แบบผสม (Mixed solar drying Type) เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีลักษณะคล้ายเครื่องอบแห้งที่มีการรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม แตกต่างที่ห้องอบจะมีลักษณะโปร่งใสเพื่อรับรังสีอาทิตย์โดยตรงได้ด้วย รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การรับรังสีอาทิตย์แบบผสม

ที่มา: คู่มือระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (2559)

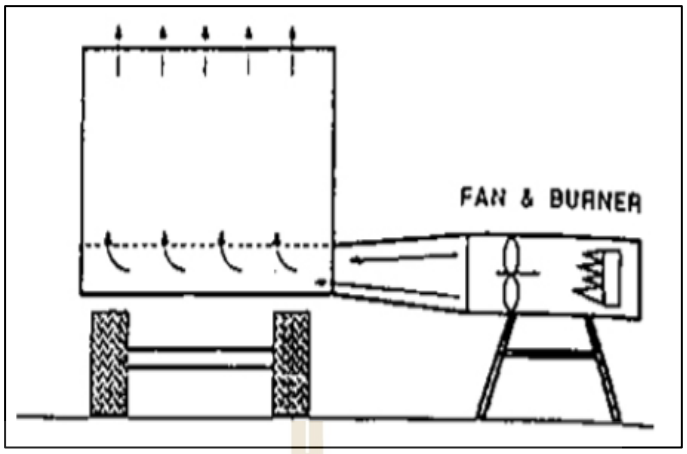
2. เครื่องอบแห้งแบบอาศัยตัวกลาง (Active) เป็นเครื่องอบแห้งที่อาศัยอุปกรณ์ที่ช่วยให้อากาศหมุนเวียนในทิศทางที่ต้องการ รูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เครื่องอบแห้งแบบอาศัยตัวกลาง

ที่มา: คู่มือระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (2561)

3. เครื่องอบแห้งแบบผสม (Hybrid) เป็นเครื่องอบแห่งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังความร้อนจากแหล่งความร้อนอื่น รูปที่ 2.23 เช่น ไฟฟ้า เชื้อเพลิง แก๊สหุงต้ม แก๊สชีวภาพ ชีวมวล ฯลฯ ในกรณีที่มีพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ หรืออุปสรรคจากปัจจัยภายนอกอันได้แก่ สภาพอากาศ ฤดูกาล และปริมาณแสงแดดที่ไม่เพียงพอ เป็นต้น



รูปที่ 2.23 เครื่องอบแห้งแบบผสม
ที่มา: คู่มือระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (2559)

2.9 ความสิ้นเปลืองพลังงาน

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำระเหย โดยมีพลังงานที่ใช้มี 2 ส่วนดังนี้

$$SEC = \frac{3.6P_e}{W_{loss}} \quad (2.8)$$

โดยที่ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water})
W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)
t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)
P_e คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (kW·hr)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.9.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

คือพลังงานที่เกิดจากการอุ่นอากาศลมร้อนด้วย LPG เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Energy = \frac{HHV \times M}{t \times 3600} \quad (2.9)$$

โดยที่ Energy คือ พลังงงานที่เข้าไปในระบบ (kW)
HHV คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
M คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg)
t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

2.9.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

หาได้จากผลคูณของแรงดันมีหน่วยเป็นโวลต์คูณด้วยกระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์ เขียนเป็นสมการออกมาได้ดังนี้

$$P=EI \tag{2.10}$$

โดยที่ P คือ กำลัง (W)

E คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

I คือ กระแส (A)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุระ ตันดี(2553) ศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง โดยทดสอบที่อุณหภูมิลมร้อนที่ 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อน 8 9 และ 10 เมตรต่อวินาทีตามลำดับทำการทดสอบในห้องอบแห้งขนาด 0.6 x 1.2 x 1.2 ลูกบาศก์เมตร กากมันสำปะหลังที่นำมาทดสอบนี้มีความชื้นเริ่มต้นที่ 76 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียกน้ำหนักเริ่มต้นที่ 500 กรัม ทำการทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของ ความชื้น ที่เวลาต่างกันจากการทดสอบพบว่า ความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาการอบแห้ง อุณหภูมิ และความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น จุดที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในการทดลองนี้ คือความเร็วลมร้อน 8 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ทำให้กากมันสำปะหลังมีอัตราส่วนความชื้นคงที่เท่ากับ 0.07 หรือความชื้น 7.69 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียกใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 2 ชั่วโมง เมื่อความชื้นของกากมันสำปะหลังลดลงค่าพลังงานความร้อนที่ได้สูงขึ้น

เวียง อากรชี(2560) พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่สำหรับอบลดความชื้นผลปาล์มน้ำมัน โดยเครื่องอบแห้งที่ออกแบบมีขนาดบรรจุ 7,500 กิโลกรัม ตัวเครื่องอบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ 1) ถังอบแห้งรูปทรงกระบอก ขับเคลื่อนการหมุนถังอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 2) พัดลมเป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางใบโค้งหลังต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า 3) เตาชีวมวลพร้อมชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดสอบอบแห้งผลปาล์ม ที่อุณหภูมิลมร้อน 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้ง ประมาณ 22 ชั่วโมง ที่ความชื้นผลปาล์มเริ่มต้น 30 ลดลงเหลือ 7 เปอร์เซ็นต์ ใช้เชื้อเพลิง 150 กิโลต่อชั่วโมง

ทศพร จันทเมธิ(2558) สร้างระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรด เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกหลังจากเก็บเกี่ยว และเพื่อลดพื้นที่ในการลดความชื้นของข้าวเปลือกโดยวิธีดั้งเดิม เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกได้ออกแบบโดยให้ข้าวเปลือกถูกปล่อยลงไปในเครื่องอบแห้งตามแรงโน้มถ่วง โดยมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของข้าวเปลือกกับแท่งอินฟราเรดเท่ากับ 70 เซนติเมตร โดยมีพัดลมเป่า

ลมเข้ามาเพื่อระบายความร้อนของอะคริลิกและแท่งฮีตเตอร์ ในการทดสอบเครื่องมีการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส โดยที่ข้าวมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 17.436 w.b. และเวียนข้าวเปลือกเข้าไปในระบบอบแห้งจำนวน 3 กิโลกรัม เป็นเวลา 2 ชั่วโมงครึ่ง และหาความชื้นสุดท้ายได้ประมาน 12.126 w.b.

พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น(2555) สร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับขดลวดความร้อนเป็นพลังงานเสริมให้มีความเหมาะสมกับสภาพปัญหาและสภาพพื้นที่ โดยเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์เมล็ดกาแฟแห้งในรูปแบบต่าง ๆ และประเมินความ พึงพอใจของเกษตรกรในพื้นที่ศึกษา ซึ่งเครื่องอบแห้งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนพื้นที่อบแห้งผลิตภัณฑ์ ส่วนพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ และส่วนขดลวดความร้อน มีขนาดพื้นที่รับแสงรวม 2.45 ตารางเมตร ซึ่งใช้ขั้นตอนการทดลอง 3 ขั้นตอน ดังนี้ การลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดของเกษตรกร การลดความชื้นด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับขดลวดความร้อน มีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้เมล็ดกาแฟสดจำนวน 5 กิโลกรัมต่อครั้ง พบว่า ขั้นตอนการทดลองที่ 1 เมล็ดกาแฟมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 51.63 มาตรฐานแห้ง (d.b.) มีอุณหภูมิตลอดการทดลองเฉลี่ย 25.07 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 4 วัน ได้เมล็ดกาแฟความชื้นสุดท้ายร้อยละ 22.88 d.b. ขั้นตอนที่ 2 เมล็ดกาแฟมีความชื้นเท่ากับขั้นตอนที่ 1 ซึ่งวัดค่าอุณหภูมิภายในส่วนพื้นที่อบแห้งผลิตภัณฑ์เฉลี่ย 40.74 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 3 วัน เมล็ดกาแฟมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 21.1 d.b. และขั้นตอนที่ 3 เมล็ดกาแฟมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 51.47 d.b. ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 2 วัน เมล็ดกาแฟที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 25.79 d.b. โดยทั้ง 3 ขั้นตอน เมล็ดกาแฟอบแห้งมีคุณภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟในพื้นที่มีความพึงพอใจต่อโครงการวิจัยอยู่ในระดับมาก และเมื่อสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟใช้งานเกษตรกรจะมีระยะเวลาการคืนทุนภายใน 10 เดือน

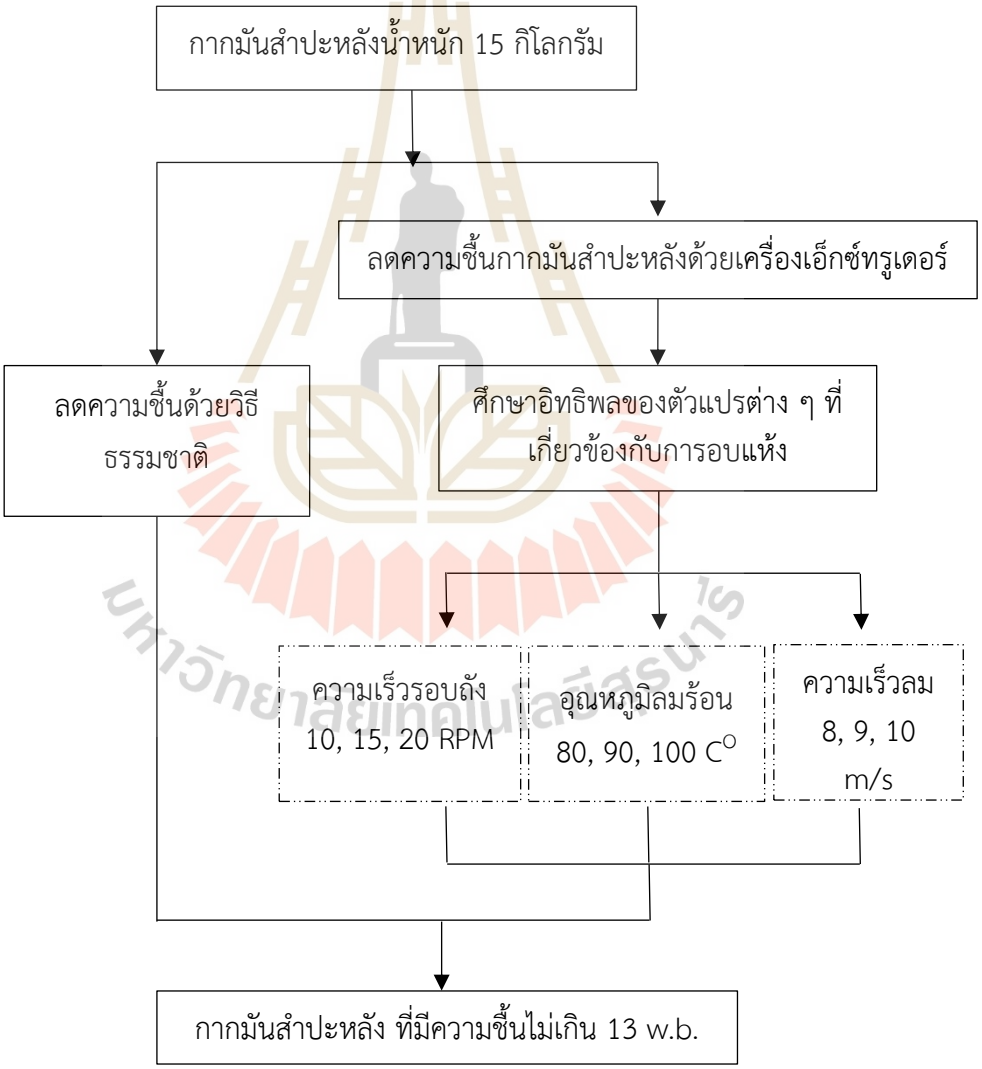
วิเชียร ดวงสีเสน(2556) หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนต้นแบบซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 3 มิลิเมตร ความจุ 0.5 ลูกบาศก์เมตร ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง ทดสอบอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีการเอกซ์ทรูชั่น ปริมาณ 20, 40 และ 60 กิโลกรัม ที่สภาวะการอบแห้งอุณหภูมิลมร้อน 100 และ 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 0.25 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบโรตารี 6 รอบต่อนาที ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากเส้นลักษณะการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง เวลาในการอบแห้ง ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการทดสอบพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังคือ อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส และปริมาณกากมันสำปะหลัง 40 กิโลกรัม เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงสุด คือ 13.60 kg_{water} /hrโดยใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำและระยะเวลาในการอบแห้งต่ำสุดคือ 5.62 MJ /kg_{water} และ 1.5 hr ตามลำดับ โดยกากมันสำปะหลังที่ค้างในตะแกรงห้องอบแห้งมีความชื้นเฉลี่ย 14.55 d.b. และมีสัดส่วนมวลแห้งคงค้าง 44 เปอร์เซ็นต์ของ

สุทิศา เข็มผะกา(2557) ทดสอบสุกรลูกผสม 3 สาย (แลนด์เรช x ลาร์จไวท์ x ดูร็อค) น้ำหนักเฉลี่ย 16.3±1.92 กิโลกรัม จำนวน 100 ตัว (เพศผู้ตอน 50 ตัว และเพศเมีย 50 ตัว) โดยทำการสุ่มสุกรออกเป็น 5 กลุ่ม แต่ละกลุ่มแบ่งออกเป็น 4 ซ้ำ ๆ ละ5 ตัว ทำการเลี้ยงจนกระทั่ง สุกรมีน้ำ หนักส่งตลาด ใช้แผนงานทดลอง แบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) อาหารทดลองมี5 สูตร คือ 1) สูตรควบคุม 2) กากมันสำปะหลัง 15% + น้ำ กากส่าเหล้า 3% น้ำหนักตัว 3)กากมันสำปะหลัง 15% + น้ำกากส่าเหล้า 6% น้ำ หนักตัว 4) กากมันสำปะหลัง 30% + น้ำกากส่าเหล้า 3% น้ำหนักตัว และ 5) กากมันสำปะหลัง 30% + น้ำกากส่าเหล้า 6% น้ำหนักตัว ให้อาหารและน้ำ แบบเต็มที่ตลอดการทดลอง ผลการทดลอง พบว่ากากมันสำปะหลังสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในสูตรอาหาร สุกรได้ถึงระดับ 30% เมื่อใช้ร่วมกับน้ำกากส่าเหล้า 3-6% น้ำหนักตัว โดยการใช้กากมันสำปะหลังที่ระดับ 30% ร่วมกับน้ำกากส่าเหล้า 3-6% น้ำหนักตัวสามารถเพิ่มประชากรจุลินทรีย์ *Lactobacillus* spp. ($P<0.05$) ได้แต่ไม่มีผลเปลี่ยนแปลงจุลินทรียก์ก่อโรค E. coli และการผลิตแอมโมเนีย การใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำกากส่าเหล้าทุกระดับในช่วงสุกรเล็ก - รุ่น มีต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่ำกว่ากลุ่มควบคุม แต่เมื่อพิจารณาตลอดช่วงการเลี้ยง (สุกรเล็ก - ขุน) มีเพียงการใช้กากมันสำปะหลังที่ระดับ 15% ร่วมกับน้ำกากส่าเหล้า 3% น้ำหนักตัวเท่านั้นที่มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่ากลุ่มควบคุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
เครื่องมือและการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการทดลอง 2 รูปแบบ ดังนี้ 1.วิธีการลดความชื้นด้วยวิธีการธรรมชาติ 2.วิธีการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน โดยผ่านการเตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่นโดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้



3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินทดลอง

สำหรับการดำเนินโครงการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์สำหรับการวัดและทดสอบมีรายการดังต่อไปนี้

1). เครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ รูปที่ 3.1

2). เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เครื่องต้นแบบ ใช้สำหรับลดความชื้นทางกลและปรับปรุงคุณสมบัติของกากมัน รูปที่ 3.2

3). ตู้อบหาความชื้นแบบอินฟราเรด (TGM 800) รูปที่ 3.3 ใช้สำหรับอบตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้าย พิกัดการทำงาน

น้ำหนักตัวอย่าง	
ถ้วยขนาด 1.5 นิ้ว	ไม่เกิน 1 กรัม
ถ้วยขนาด 2.4 นิ้ว	ไม่เกิน 3 กรัม
จำนวนตัวอย่าง	
ถ้วยขนาด 1.5 นิ้ว	ไม่เกิน 16 (+1 ตัวอย่างอ้างอิง) ถ้วย
ถ้วยขนาด 2.4 นิ้ว	ไม่เกิน 10 (+1 ตัวอย่างอ้างอิง) ถ้วย
ช่วงอุณหภูมิการทำงาน	50 ถึง 175 องศาเซลเซียส
ความแม่นยำ	0.02 เปอร์เซ็นต์ RSD
ความแม่นยำเครื่องชั่ง	0.0001 กรัม

4). เครื่องวัดรอบ (DT-2234C+ digital Tachometer) รูปที่ 3.4 ใช้สำหรับวัดรอบการทำงานของคลีบตะแกรง

ช่วงการทำงาน	2.5 ถึง 999.99 รอบต่อนาที
ความแม่นยำ	0.005 เปอร์เซ็นต์ RSD
ระยะการวัด	5 ถึง 20 เซนติเมตร

5). อุปกรณ์วัดความเร็วลม (UT363 mini anemometer) รูปที่ 3.5 ใช้สำหรับวัดความเร็วลมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

ความเร็วลม	0 ถึง 30 เมตรต่อวินาที
ความแม่นยำ	5 เปอร์เซ็นต์ RSD
ช่วงอุณหภูมิการทำงาน	-10 ถึง 50 องศาเซลเซียส

6). เครื่องวัดอุณหภูมิ (XH-W3002 digital thermostat) รูปที่ 3.6 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศภายในถังอบแห้ง

ช่วงอุณหภูมิการควบคุม	-50 ถึง 110 องศาเซลเซียส
ช่วงวัดอุณหภูมิ	-50 ถึง 110 องศาเซลเซียส
ความแม่นยำในการควบคุม	1 เปอร์เซ็นต์ RSD
ความแม่นยำในการวัด	2 เปอร์เซ็นต์ RSD

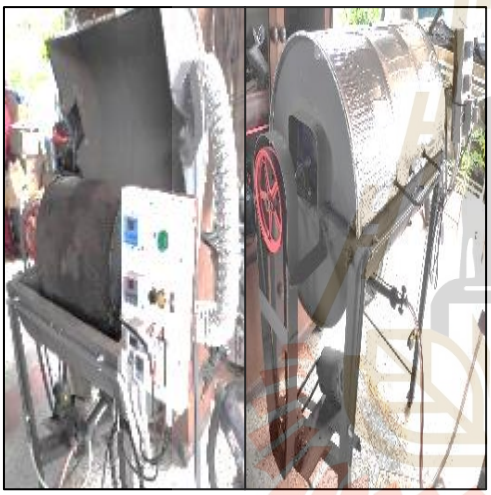
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7). เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล สำหรับชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้ง รูปที่ 3.7

ความแม่นยำ	2 กรัม
น้ำหนักชั่งต่ำสุด	200 กรัม
น้ำหนักชั่งสูงสุด	40 กิโลกรัม

8). อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter) รูปที่ 3.8 ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง

กระแสไฟฟ้า	5 ถึง 80 แอมป์
แรงดันไฟฟ้า	220 โวลต์
ความถี่	50 เฮิรตซ์
กำลังไฟ	17000 วัตต์
ช่วงอุณหภูมิการทำงาน	-20 ถึง 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 เครื่องต้นแบบเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

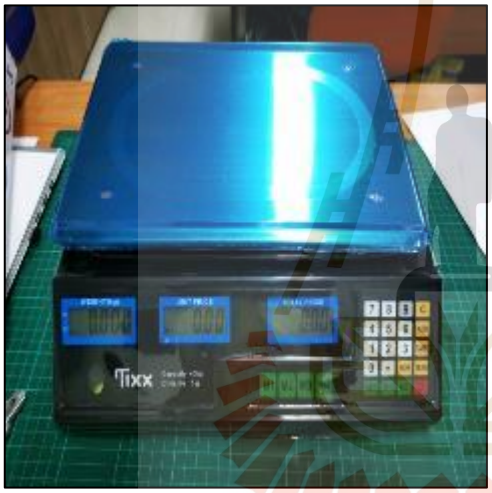
รูปที่ 3.2 เครื่องต้นแบบเครื่องเอ็กซ์ทรู

รูปที่ 3.3 ตู้อบหาความชื้น

รูปที่ 3.4 เครื่องวัดรอบ

รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความเร็วลม

รูปที่ 3.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

รูปที่ 3.8 อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 วิธีการ

3.2.1 การหาค่าความชื้นตั้งต้นเฉลี่ย

ทำการหาค่าความชื้นมาตฐานเปียกเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังสด จากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังจังหวัดนครราชสีมา โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างการทดลอง ใส่ซองสุญญากาศ รูปที่ 3.9 แช่ด้วยน้ำแข็ง และเก็บไว้ในกล่องเก็บความเย็นก่อนนำเข้ากระบวนการ โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างภายใน 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง LECO TGM 800 ด้วยวิธีการ AOAC-Food ที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส ในถ้วยฟอยล์ขนาด 1.5 นิ้ว รูปที่ 3.10 โดยที่น้ำหนักในแต่ละถ้วยจะไม่เกิน 1 กรัม สูงสุดไม่เกินครั้งละ 16 ตัวอย่าง โดยระยะเวลาในการทำงานขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการอบไล่ความชื้นนั้นก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.11 เครื่องจะแสดงผลการทดสอบให้เป็นความชื้นฐานเปียก (w.b.)

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกากมันสำปะหลังสด

รูปที่ 3.10 ถ้วยฟอยล์ขนาด 1.5 นิ้ว

รูปที่ 3.11(A) ตัวอย่างกากหลังอบ

รูปที่ 3.11(B) ตัวอย่างกากหลังอบ

3.2.2 ส่วนประกอบและการทำงานเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลัง เครื่องต้นแบบ

เนื่องจากเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังประกอบไปด้วยส่วนประกอบสองส่วนหลัก คือ ส่วนของห้องอบแห้ง และตะแกรงกวนที่สัมพันธ์กัน การออกแบบดำเนินการดังนี้

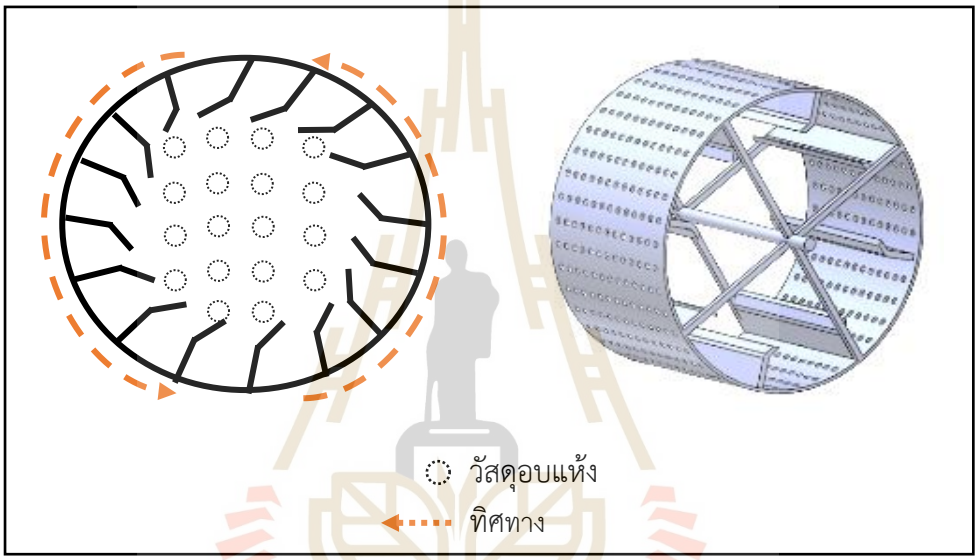
1). ขนาดของห้องอบแห้ง

การออกแบบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังได้กระทำบนขอบเขตของงานวิจัยที่กำหนดไว้ว่าปริมาตรส่วนของห้องอบแห้งมีขนาด 0.26 ลูกบาศก์เมตร เพื่อให้สอดคลองกับปริมาณของกากมันสำปะหลังสดที่มีความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ที่ 726.43 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าว ได้นำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบขนาดห้องอบแห้งโดยเริ่มการคำนวณจากการกำหนดขนาดห้องอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 39 เซนติเมตร ความสูง 55 เซนติเมตร จากเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูง ได้ทำการเผื่อระยะห่างระหว่างผนังด้านหน้าและด้านข้าง ออกจากตะแกรงกวนข้างละ 4

เซนติเมตร ดังนั้นในส่วนของตะแกรงใบกวนจึงมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 31 เซนติเมตร ความสูง 47 เซนติเมตร เลือกใช้รูตะแกรง 2 มิลลิเมตร ระยะห่างต่อรู 3 มิลลิเมตร

2). รูปแบบครีบตะแกรง

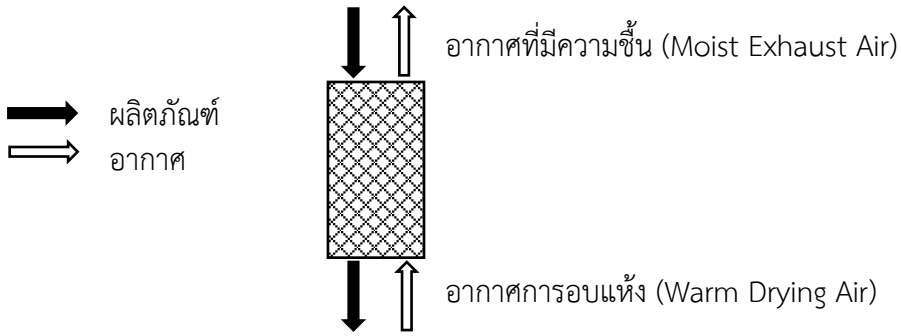
ในห้องอบใช้ครีบตะแกรงทำหน้าตักกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ให้มีลักษณะที่มีความหมาด ร่วน แตกตัวได้ง่ายขึ้น และไม่จับตัวเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ แต่ไม่ละเอียดมาก จากด้านล่างปล่อยตกจากด้านบนตามทิศทางโน้มถ่วง เพื่อให้กากมันสำปะหลังเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับมวลอากาศร้อนจากแหล่งกำเนิด จึงใช้รูปแบบครีบตะแกรง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปแบบของครีบ (Flights and Lifters of Rotary Drum)

3). ทิศทางของตะแกรง

เนื่องด้วยต้องให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างสม่ำเสมอทั้งกระบวนการ จึงกำหนดให้ตะแกรงหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา เพื่อให้อยู่ในลักษณะการไหลของมวลอากาศแบบไหลสวนทาง (Counter-Current Flow) อากาศจะไหลสวนทิศกับการไหลของวัสดุอบแห้ง ดังรูปที่ 3.13



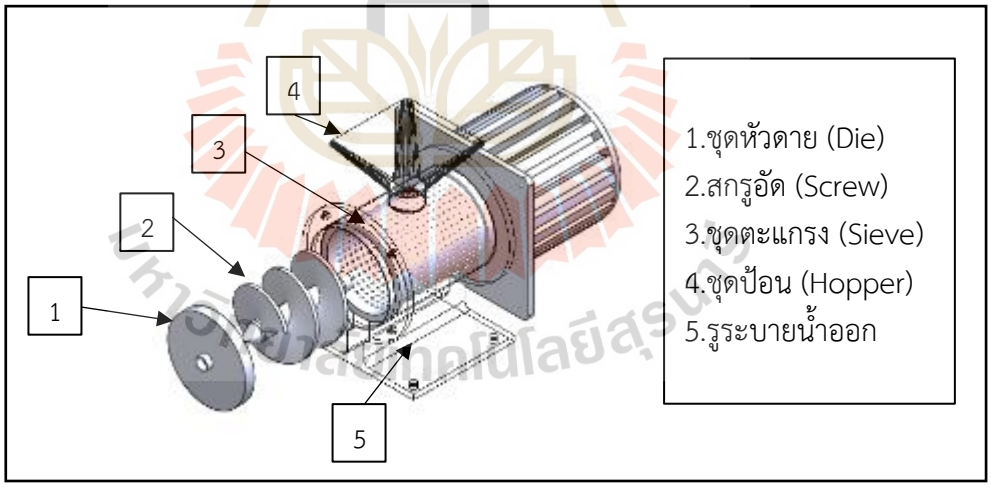
รูปที่ 3.13 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทาง (Counter- Current Flow)

3.2.3 เตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่น

(วิเชียร ดวงสีเสน, 2555) ทดสอบนำกากมันสำปะหลังสดซึ่งออกจากกระบวนการผลิตแป้งมาทำการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติ โดยไม่ผ่านกระบวนการลดความชื้นทางกล (Extrusion) ปรากฏว่า กากมันสำปะหลังที่ได้ ออกมามีสองส่วนคือส่วนที่ผ่านตะแกรงยังมีความชื้นสูงและส่วนที่ค้างภายในตะแกรงซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลม และยังมีความชื้นสูง รูปที่ 3.14 โดยที่ผิวภายนอกของลูกกลมมีลักษณะแห้ง แต่ความชื้นภายในยังสูงทำให้เมื่อจัดเก็บจะเกิดเชื้อรา ดังนั้นก่อนการอบแห้งจึงได้ใช้กระบวนการรีดน้ำ (Dewatering) ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) รูปที่ 3.15 ในการลดปริมาณน้ำในกากมันสำปะหลังเบื้องต้นก่อนการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้ง

รูปที่ 3.14(A) กากมันสำปะหลังที่ค้างภายในตะแกรง

รูปที่ 3.14(B) กากมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรง



รูปที่ 3.15 แบบร่างประกอบเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder)

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้สามารถลดความชื้นบางส่วนจากกากมันสำปะหลังได้ ซึ่งสามารถใช้วิธีทางกลในการอัดรีดน้ำส่วนนี้ออกมาได้ในระดับหนึ่งและสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของกากมันสำปะหลังสดได้โดยชุดเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีส่วนประกอบดังนี้

1). หัวดาย (Die) เป็นทางออกของวัสดุที่ถูกอัดรีด (Extruded) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูกลมขนาดเล็กเพื่อทำให้เกิดการอั้น หรือเกิดแรงอัดตัวเพิ่มขึ้นเพื่อประโยชน์ในการดึงน้ำออกจากกากมันสำปะหลังสด

2). สกรูอัดรีด (Screw) บีบอัดกากมันสำปะหลังเพื่อให้รีดน้ำออก

3). ตะแกรง (Sieve) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งทำจากแผ่นเหล็กตะแกรง ทำหน้าที่เป็นชั้นบีบอัดน้ำออกจากกากมันสำปะหลังให้ไหลรอดรูตะแกรงลงไปยังรูระบายน้ำ

4). ตัวป้อนวัสดุ (Hopper) เป็นส่วนรองรับวัตถุดิบ (กากมันสำปะหลังสด) ที่จะทำการอัดรีดเพื่อลดความชื้น โดยมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมปากกว้างเพื่อให้ง่ายต่อการป้อนวัตถุดิบลงสู่ชุดสกรูอัดรีด

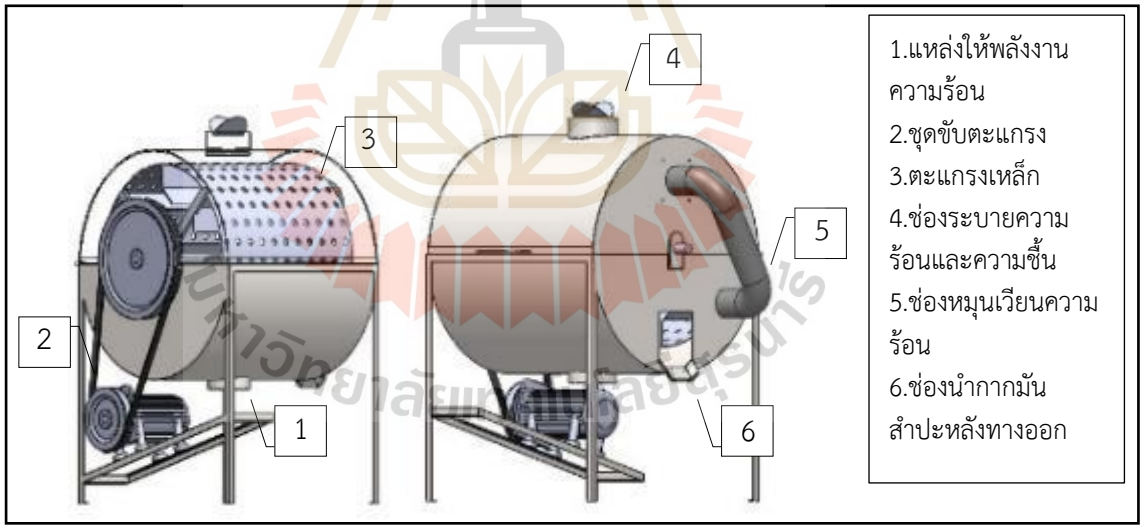
5). รูระบายน้ำออก เป็นส่วนทางออกของน้ำที่ถูกบีบอัดจากกากมันสำปะหลัง

3.2.4 วิธีการเตรียมกากมันสำปะหลัง

นำกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานมาผ่านกระบวนการลดความชื้นทางกลโดยหลักการเอ็กซ์ทรูชั่น โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นำกากมันสำปะหลังที่ได้จากการลดความชื้นทางกลจัดเก็บในภาชนะปิดสนิทเพื่อเตรียมทำการทดลอง

3.2.5 รายละเอียดเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นห้องอบแห้งทรงกระบอกหุ้มฉนวนโดยภายในเป็นถังตะแกรงทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รายละเอียดเครื่องอบแห้ง

1). แหล่งให้พลังงานความร้อน (Gas stove) ทำหน้าที่นำความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้มหรือแก๊สชีวมวล

2). ชุดขับตะแกรงถังอบแห้ง เพื่อขับให้ตะแกรงตักกากมันสำปะหลังมีการแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางสวนทางกับลมร้อน และลดการจับตัวเป็นก้อนของกากมันสำปะหลัง

3). ตะแกรงเหล็ก ทำหน้าที่ตักกากมันสำปะหลังมีการแลกเปลี่ยนความร้อนในทิศทางสวนทางกับลมร้อนเพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีที่สุด

4). ท่อระบายความร้อนและความชื้น ภายในถังอบแห้งลดไอน้ำและความร้อนส่วนเกินบางส่วนภายในออก

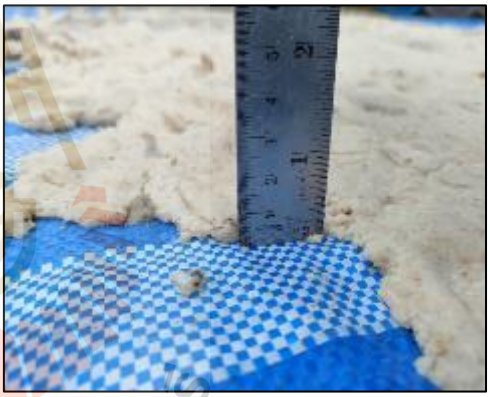
5). ท่ออากาศวนกลับภายในถังอบ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนทิ้งเนื่องจากลมร้อนที่ออกมายังมีอุณหภูมิสูงอยู่

6). ช่องทางออกกากมันสำปะหลัง เป็นช่องทางออกของวัสดุจากถังอบกากมันสำปะหลัง

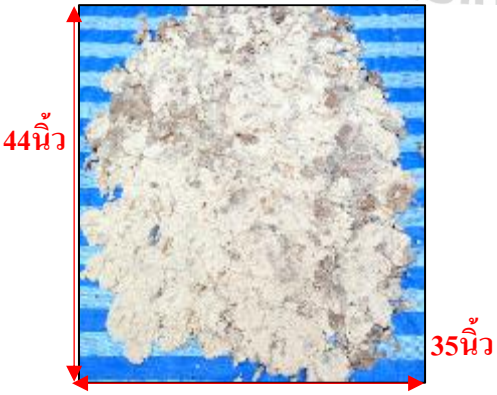
3.2.6 การตากแห้งลานปูน

เป็นวิธีการไล่ความชื้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ แบบไม่อาศัยตัวกลาง (Passive) ประเภทการอบแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ (Natural Type) ด้วยการตากแห้งในพื้นลานปูน โดยทดลองตากแห้งในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 64 ช่วงเวลาเริ่มตากแห้งตั้งแต่ 9.00 ถึง 17.00 มีอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุดอยู่ที่ 34.7 ถึง 37.5 องศาเซลเซียส (ข้อมูลวัดได้ ณ สถานที่การทดลอง) โดยใช้กากมันสำปะหลังสดรูปที่ 3.17 ความหนาในการตากลานปูนไม่เกิน 5 มิลลิเมตรรูปที่ 3.18 น้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง 15 กิโลกรัม ใช้พื้นที่ในการตาก 111.76 X 88.9 เซนติเมตร (44 X 35 นิ้ว) โดยประมาณรูปที่ 3.19 โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที และเขี่ยกากมันที่จับตัวแผ่นทุก 1 ชั่วโมง รูปที่ 3.20

รูปที่ 3.17 กากมันสำปะหลังสด



รูปที่ 3.18 ความหนาในการตากลานปูนไม่เกิน 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 พื้นที่ในการตาก 111.76 X 88.9 เซนติเมตร (44 X 35 นิ้ว)

รูปที่ 3.20 เขี่ยกากมันที่จับตัวเป็นแผ่น

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
- ค่าความชื้นกากมัสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องอบ	- สุ่มเก็บตัวอย่างทุกครั้งที่เริ่มทำการทดลองด้วยสภาวะต่าง ๆ	- ค่าความชื้นตั้งต้น
- น้ำหนักกากมัสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง	- เก็บตัวอย่างที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ชั่งน้ำหนักโดยเก็บตัวอย่าง หลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง	- สัดส่วนมวลแห้ง กากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด - น้ำหนักของกากมัสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (มวลแห้ง)
- ค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง	- เก็บตัวอย่างที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ชั่งน้ำหนัก โดยเก็บตัวอย่าง หลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง	- สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังภายนอกตะแกรง
- ความชื้นกากมัสำปะหลังภายในถังอบแห้ง	- หยุดหมุนถังอบสุ่มตัวอย่างนำไปหาความชื้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นเหลือน้อยกว่า 13 w.b.	- สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในถังอบ - ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง - อัตราส่วนความชื้นกากมันสำปะหลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง(ต่อ)

- น้ำหนักของแก๊สที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง	- ชั่งน้ำหนักแก๊สก่อนและหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง	- ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน
- พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง	- บันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไประหว่างทำการทดลองโดยใช้ค่าพลังงานก่อนและหลังเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง	- ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

ข้อมูลที่ได้จะใช้ในการวิเคราะห์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยของน้ำ, อัตราส่วนความชื้น, ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, สัดส่วนการลอดผ่านรูตะแกรง, สัดส่วนการคงค้างภายในถังอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการคือ 13 w.b. ต่อปริมาณน้ำ โดยการหาปริมาณน้ำที่ถูกระเหยไปจนเหลือความชื้นต่ำกว่า 13 w.b.

จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง โดยพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังมี 2 ส่วนดังนี้

1). ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนเป็นความสิ้นเปลืองที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการทดลองนี้ใช้แก๊สหุงต้มหรือแก๊สชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ 3.1

$$SEC_{LPG} = \frac{HHV \times M}{W_{loss}} \quad (3.1)$$

โดยที่ SEC_{LPG} คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของพลังงานที่เข้าไปในระบบ (kJ/kg_{water})

HHV คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg) (HHV_{LPG}= 50,140 kJ/kg, U.S. Department of energy, 2556)

M คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)

W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2). ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากมอเตอร์ต้นกำลังต่าง ๆ (kW) ซึ่งดูจากมิเตอร์ไฟฟ้าดังนี้

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) สมการที่ (3.2)

$$SEC_{PE} = \frac{3.6P_e}{W_{loss}} \quad (3.2)$$

โดยที่ SEC_{PE} คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water})

W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)

P_e คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (kW·hr)

-ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis moisture content) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$M_w = \frac{w\text{-}d}{w} \quad (3.3)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.)

W คือ มวลของวัสดุ (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด) (kg)

-ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$M_{eq} = \frac{w\text{-}d}{w_1} \quad (3.4)$$

โดยที่ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (w.b.)

W คือ มวลสุดท้ายของวัสดุจากเครื่องอบแห้ง (kg)

W_1 คือ มวลก่อนทำการอบแห้ง (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (อบแห้งแบบอินฟราเรด) (kg)

-อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.5)

เป็นความสามารถในการกำจัดความชื้นออกจากวัสดุโดยดูจากอัตราการระเหยของน้ำต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการ (4), สุทธิศักดิ์ (2254)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$DR = \frac{m_d(M_{pi}-M_{pf})}{t} \quad (3.5)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้ง ($kg_{water}\ h^{-1}$)

m_d คือ มวลของกากมัน (kg)

M_{pi} คือ ความชื้นก่อนอบแห้ง (w.b.)

M_{pf} คือ ความชื้นหลังอบแห้ง (w.b.)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

-เปอร์เซ็นต์การร่วงผ่านตะแกรง สามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงต่อมวลแห้งของกากมันสำปะหลังสามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$GPS = \frac{GW}{AW} \times 100\% \quad (3.6)$$

โดยที่ GPS คือ เปอร์เซ็นต์การร่วงผ่านตะแกรง

GW คือ มวลกากมันสำปะหลังแห้งที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (kg)

AW คือ มวลกากมันสำปะหลังแห้งทั้งหมด (kg)

3.2.7 วิเคราะห์การประเมินการนำไปใช้เพื่อการลดต้นทุนเป็นอาหารสัตว์ทดแทน

ด้วยกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ได้ เนื่องจากมีคาร์โบไฮเดรตหรือแป้งอยู่เหลือประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ และมีเส้นใยสูงประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ (สุทิศา เข็มผกา, 2555) อีกทั้งยังมีปริมาณไซยาไนค์เท่ากับ 16.6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ยุวเรศและคณะ, 2550) ซึ่งอยู่ในระดับที่ปลอดภัยในการนำมาใช้ประกอบเป็นอาหารสัตว์ทดแทน โดยนำการทดลองการบริโภคของสัตว์เลี้ยงและต้นทุนกากมันสำปะหลังอบแห้งจากเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน มาวิเคราะห์และประเมินความสามารถในการลดต้นทุนเป็นอาหารสัตว์ทดแทน

3.2.7.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ

กำหนดใช้อาหารไก่พันธุ์เนื้อเบทาโกร 203A สำหรับไก่พันธุ์เนื้ออายุ 1-17 วัน ใช้กากมันสำปะหลังที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ และอาหารไก่พันธุ์เนื้อเบทาโกร 204 สำหรับไก่พันธุ์เนื้ออายุ 18-45 วัน ใช้กากมันสำปะหลังที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทดลองเลี้ยงไก่พันธุ์ (ไก่กระทง) เนื้อจำนวน 100 ตัว ค่า pH ของน้ำดื่ม 6.4-8.5 การให้น้ำอ้างอิงตาม Pesti et al (1985

;Bell and Weaver, 2002) ความหนาแน่นการเลี้ยง 30.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในฤดูหนาว และประมาณ 29.3 กิโลกรมต่อตารางเมตรในฤดูร้อน (Arbor Acres Broiler Management Guide, 2009) ในโรงเรือนระบบ Evaporative cooling system ระยะเวลาในการเลี้ยง 60 วัน (ผศ.ดร. ประภากร ธาราฉาย, 2560) โดยอัตราการให้อาหารต่อวันและน้ำหนักตัวเฉลี่ย ตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ปริมาณอาหารที่ไก่กินของไก่กระทงเลี้ยงแบบคละเพศ

อายุ (สัปดาห์)	อุณหภูมิโรงเรือน (องศาเซลเซียส)			
	10.0	21.1	32.2	37.8
ปริมาณอาหารที่กิน (กิโลกรัมต่อไก่100 ตัว)				
1*	1.68	1.68	1.64	1.59
2*	4.54	4.14	4.00	3.96
3*	6.68	6.50	6.09	7.64
4**	9.41	9.05	8.36	8.64
5**	12.09	11.50	10.18	9.50
6**	15.00	14.37	12.46	11.23
7**	18.20	17.09	14.59	12.91
8**	20.20	18.82	16.09	13.96
น้ำหนักตัวเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อตัว)				
1*	0.15	0.15	0.15	0.14
2*	0.41	0.39	0.37	0.35
3*	0.65	0.70	0.65	0.63
4**	0.99	1.06	0.97	0.92
5**	1.36	1.46	1.29	1.21
6**	1.76	1.89	1.62	1.49
7**	2.19	2.34	1.94	1.73
8**	2.60	2.78	2.12	1.92

หมายเหตุ: *ใช้กากมันสำปะหลังผสมอาหารไก่พันธุ์เนื้อที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์

**ใช้กากมันสำปะหลังผสมอาหารไก่พันธุ์เนื้อที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์

ที่มา: ผศ.ดร.ประภากร ธาราฉาย(2560)

3.2.7.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ

กำหนดใช้อาหารปลากินพืชเบทาโกร 842 สำหรับปลากินพืชอายุไม่เกิน 3 สัปดาห์ อาหารปลากินพืชเบทาโกร 843 สำหรับปลากินพืชอายุ 3 สัปดาห์ขึ้นไป ผสมกากมันสำปะหลัง 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับทดสอบปลานิลขาวแปลงเพศจำนวน 100 ตัว อายุ 3 สัปดาห์ น้ำหนักเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 500 กรัม ค่า pH ของบ่อน้ำ 6.4-8.0 ปริมาณออกซิเจนไม่ต่ำกว่า 4 มิลลิกรัม

ต่อลิตร ปริมาณแอมโมเนียไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นด่างไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อ้างอิงตาม Pesti et al (1985 ;Bell and Weaver, 2002) ความหนาแน่นการเลี้ยง 50 ตัว ต่อลูกบาศก์เมตร เลี้ยงในกระชัง ทดสอบเลี้ยงเป็นระยะเวลา 18 สัปดาห์(กรมการค้าภายใน) ความถี่ในการใช้อาหาร 2-4 ครั้งต่อวัน ปริมาณการให้อาหาร ตารางที่ 3-3 ศูนย์เรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียง ต.ธารปราสาท อ.โนนสูง จังหวัดนครราชสีมา

ตารางที่ 3-3(A) ปริมาณอาหารการเลี้ยงปลานิลขาวแปลงเพศ

อายุ (สัปดาห์)	**น้ำหนักตัว (กรัม)**	**ปริมาณอาหาร (เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัว)**	**ความถี่ (รอบต่อวัน)**
3	75	4	4
5	100	4	4
7	150	3.5	3
9	200	3.5	3
11	300	3	3
13	400	3	3
15	500	2.5	2
17	600	2	2
19	750	1.5	2
21	900	1.5	2

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ที่มา: บริษัท เบทาโกร จำจัด (มหาชน) **,**Animal Nutrition Technique Center (ANTC)

ตารางที่ 3-3(B) ปริมาณอาหารการเลี้ยงปลานิลขาวแปลงเพศ

ปริมาณการให้อาหารปลานิลสะสม*100ตัว	
อายุ (สัปดาห์)	**ปริมาณอาหาร (กิโลกรัม ต่อ สัปดาห์)**
1	8.4
2	8.4
3	8.4
4	8.4
5	11.2
6	11.2
7	11.025

ตารางที่ 3-3(B) ปริมาณอาหารการให้ปลานิลขาวแปลงเพศ(ต่อ)

ปริมาณการให้อาหารปลานิลสะสม*100ตัว	
อายุ (สัปดาห์)	**ปริมาณอาหาร (กิโลกรัม ต่อ สัปดาห์)**
8	11.025
9	14.7
10	14.7
11	18.9
12	18.9
13	25.2
14	25.2
15	17.5
16	17.5
17	16.8
18	16.8
19	15.75
20	15.75
21	18.9

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ที่มา: บริษัท เบทาโกร จำจัด (มหาชน) ,Animal Nutrition Technique Center (ANTC)

3.3 สถานที่ทำการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4 ระยะเวลาทำการทดลอง

ระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 16 กุมภาพันธ์ 64

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบอบแห้งกากมันสำปะหลังที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในขั้นตอนแยกกากหยาบ ด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนเครื่องต้นแบบ โดยนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการไล่ความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งแบบธรรมชาติ กากมันสำปะหลังสดที่เป็นวัตถุดิบในการทำการทดลองเป็นกากมันเปียกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังจังหวัดนครราชสีมา นำมาทดสอบหาความชื้นตั้งต้นด้วยเครื่องหาความชื้น LECO TGM800 บนมาตรฐาน AOAC-Food ที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส ในถ้วยขนาด 1.5 นิ้ว

4.1 ผลการทดลองค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสด

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสด

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบแห้ง (กรัม)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังอบแห้ง (กรัม)	ความชื้นฐานเปียก(w.b.)
1	0.9613	0.2118	77.97
2	0.9378	0.2031	78.34
3	0.9412	0.2243	76.17
4	0.9373	0.9373	78.01
5	0.9144	0.9144	77.67
6	0.9131	0.9131	78.17
7	0.9950	0.995	78.64
8	0.9469	0.9469	77.05
เฉลี่ย			77.75

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองหาความชื้นของกากมันสำปะหลังสดหลังผ่านการลดความชื้นทางกล

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบแห้ง (กรัม)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังอบแห้ง (กรัม)	ความชื้นฐานเปียก(w.b.)
1	0.9293	0.2629	71.71
2	0.9586	0.3095	67.71
3	0.9866	0.3381	65.73
4	0.9292	0.3102	66.62
5	0.9216	0.2585	71.95
6	0.9516	0.2581	72.88
7	0.9144	0.3191	65.10
8	0.9714	0.2908	70.06
เฉลี่ย			68.97

ผลการทดลองหาค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา พบว่ามีค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 77.75 w.b. จากตารางที่ 4.1 และเมื่อนำกากมันสำปะหลังสดมาลดความชื้นทางกล (เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เครื่องต้นแบบ) พบว่ามีค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 68.97 w.b. จากตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าความชื้นที่ลดลงเนื่องจากมีการรีดน้ำออกในกระบวนการนี้เล็กน้อย ประสิทธิภาพการรีดน้ำขึ้นอยู่กับขนาดของตะแกรงกรองน้ำร่วมกับขนาดของมอเตอร์ เนื่องด้วยการเข้ากระบวนนี้เพื่อลดการจับตัวเป็นก้อนของกากมันสำปะหลังสด ดังรูปที่ 4.1 เพื่อลดภาระการทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับรังสีความร้อน

กากมันสำปะหลังสดที่ผ่านการลดความชื้นทางกล (เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เครื่องต้นแบบ) มีลักษณะจับตัวเป็นเส้นหมาด รูปที่ 4.2

รูปที่ 4.1 ลักษณะกากมันสำปะหลังสด

รูปที่ 4.2 ลักษณะกากมันสำปะหลังสดที่ผ่านการลดความชื้นทางกล

4.2 ผลการทดลองลดค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสดด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ

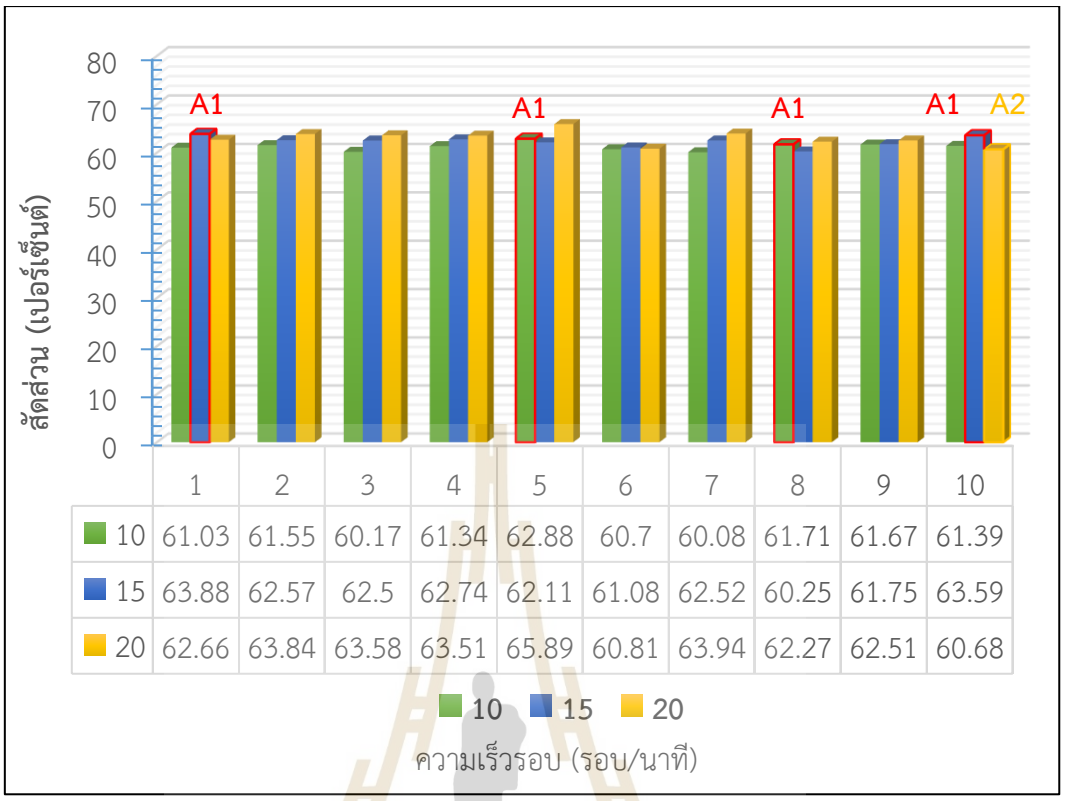
4.2.1 ลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้ง

กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งแบ่งได้ 2 ส่วน คือกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง และกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง โดยลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงเป็นเส้นใยละเอียด รูปที่ 4.3 ที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรง (2 มิลลิเมตร) กากมันสำปะหลังเหล่านี้จะร่วงผ่านรูตะแกรงสัมผัสกับตัวถังอบและช่องลมร้อนจากช่องหมุนเวียนความร้อนโดยตรง ทำให้มีความชื้นต่ำกว่ากากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง รูปที่ 4.4 จะเป็นกากมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นก้อนจึงไม่ร่วงผ่านรูตะแกรงจึงได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องและมีโอกาสรับความร้อนจากเปลวเพลิงโดยตรงในบางโอกาสขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศจากแวดล้อมด้านนอก แต่เนื่องด้วยมีขนาดที่ใหญ่ทำให้มีอัตราการสูญเสียความชื้นที่น้อยกว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง

รูปที่ 4.3 กากมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรง

รูปที่ 4.4 กากมันสำปะหลังที่ค้างภายในตะแกรง

อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบของการหมุนของตะแกรง เนื่องจากอยู่ในห้องอบแห้งแบบปิดจึงไม่ได้รับลมจากในช่องหมุนเวียนลมร้อนโดยตรงและการเคลื่อนที่ของมวลกากมันสำปะหลังที่เป็นกองในตะแกรงชนกันและถูกควบคุมทิศทางให้ตกตามทิศโน้มถ่วงด้วยครีบตะแกรงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นตะกอนเล็ก ๆ ร่วงผ่านรูตะแกรง รูปที่ 4.5 ส่วนความเร็วลมของช่องหมุนเวียนความร้อนไม่ได้สัมผัสกับกากมันสำปะหลังโดยตรงจึงทำให้ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ

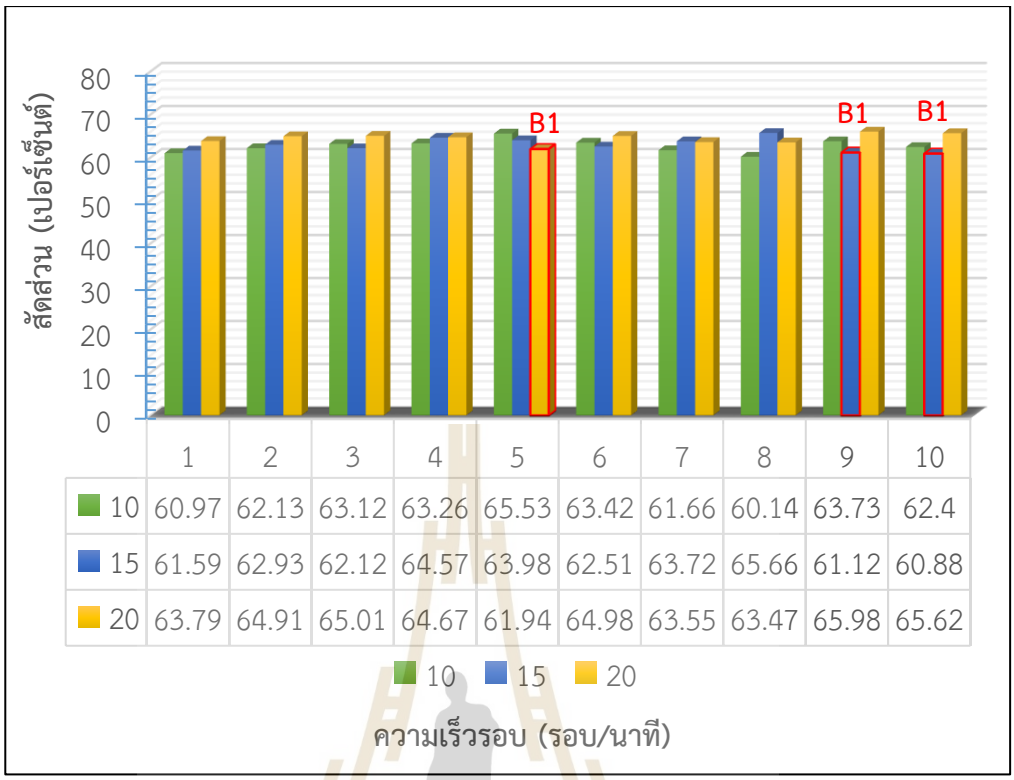


รูปที่ 4.5(A) อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

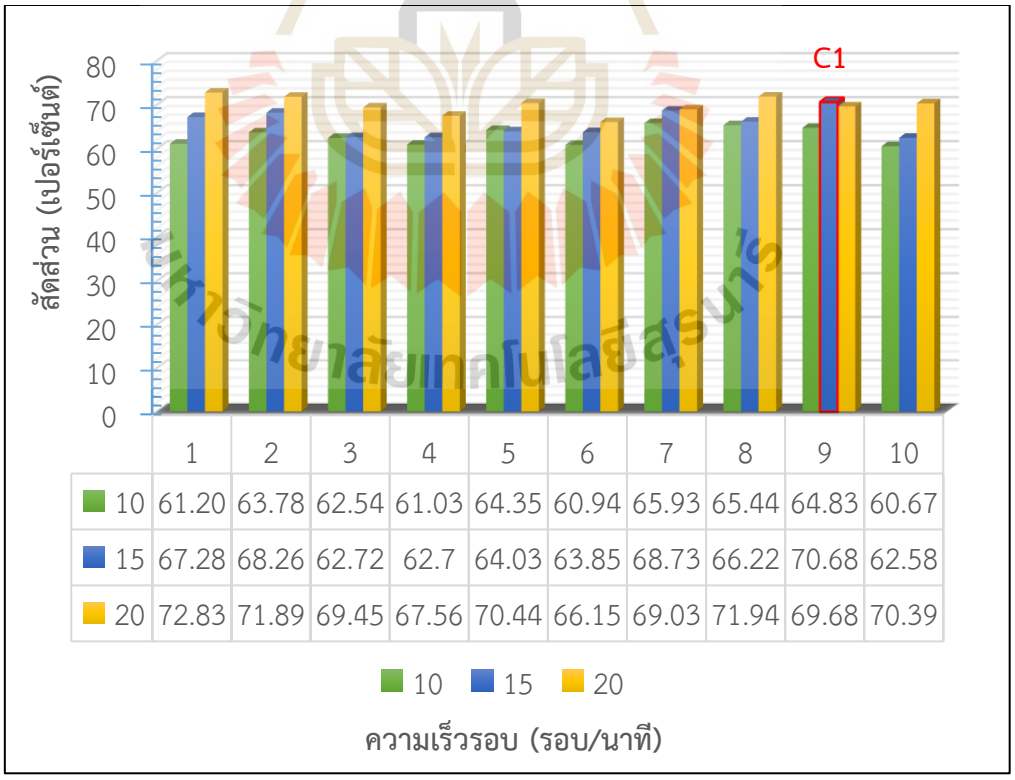
การทดสอบอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 10 15 20 รอบต่อนาที ในช่วงกลางกระบวนการจะพบสภาวะ (A2) มีอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) เนื่องจากมีการคลายความชื้นออกมายังบนพื้นผิวชั้นนอก (Boundary Moisture) จำนวนมาก ส่งผลให้เพิ่มโอกาสการจับตัวเป็นก้อน และอัตราการร่วงผ่านรูตะแกรงลดลง อีกทั้งในช่วงท้ายกระบวนการยังพบสภาวะ (A1) ที่มีอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เนื่องจากมวลน้ำในเนื้อกากมันสำปะหลัง (Absorbed Moisture) และความชื้นในระบบ (System Humidity) ลดลง ส่งผลให้โอกาสการจับตัวเป็นก้อนลดลง

การทดสอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 10 15 20 รอบต่อนาที ในช่วงท้ายกระบวนการจะพบสภาวะ (B1) มีอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เข้าสู่สภาวะ ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) ใช้ระยะเวลาน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เนื่องด้วยแผนการเก็บข้อมูลการทดลองทุก 30 นาที จนความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 13 w.b. ส่งผลให้ที่ระยะเวลาเท่ากัน มีสัดส่วนการร่วงผ่านที่สูงกว่า

การทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 10 15 20 รอบต่อนาที ในช่วงกลางกระบวนการจะพบสภาวะ (C1) มีการคลายความชื้นออกมายังบนพื้นผิวชั้นนอกมากกว่าที่อุณหภูมิ 80 และ90 องศาเซลเซียส ทำให้มีอัตราการอบแห้งคงที่นานกว่าค่าเฉลี่ย ส่งผลให้มีการจับตัวเป็นก้อนมากกว่าค่าเฉลี่ยขึ้นอยู่กับตัวแปรแวดล้อม



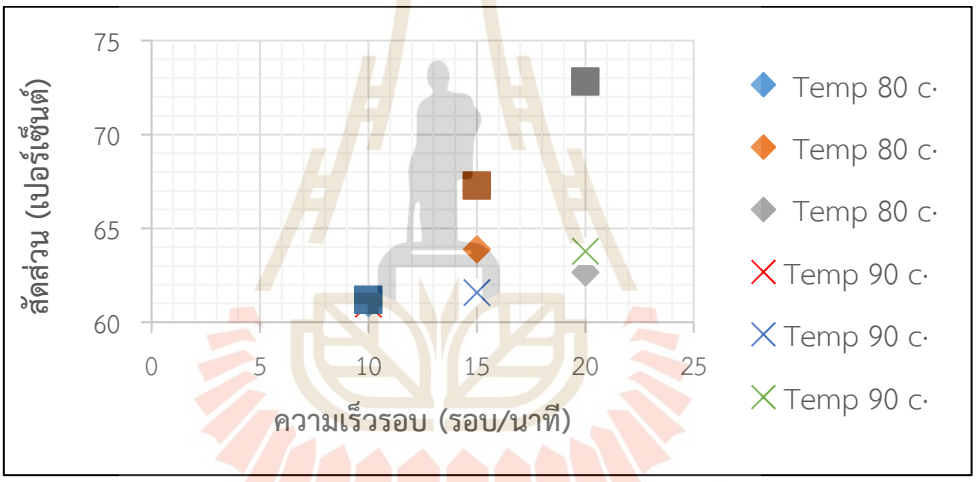
รูปที่ 4.5(B) อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



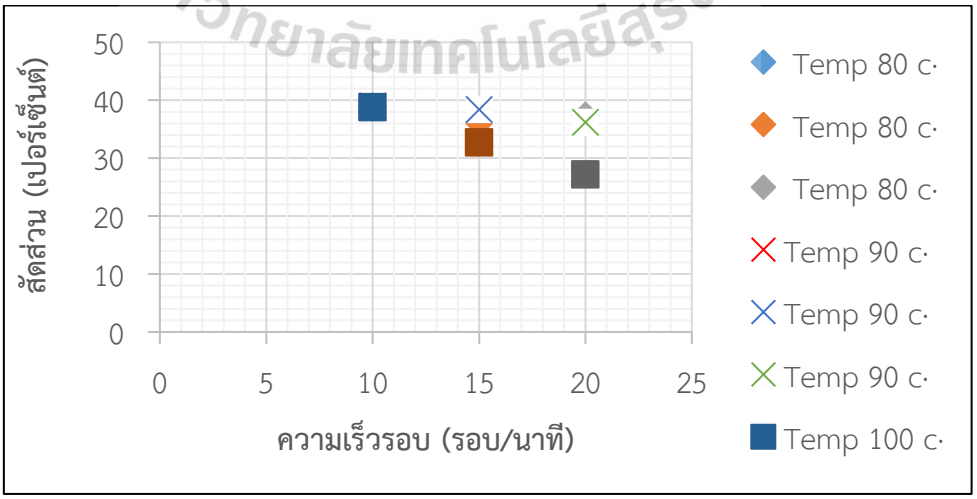
รูปที่ 4.5(C) อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

4.2.2 สมรรถนะของเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

เมื่อทำการทดสอบอบแห้งกากมันสำปะหลังสดน้ำหนัก 15 กิโลกรัม ที่มีความชื้นฐานเปียกตั้งต้นเฉลี่ยอยู่ที่ 68.975 w.b.(ผ่านการรีดน้ำด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เครื่องต้นแบบ) มาทดสอบด้วยเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนโดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) (HHV_{LPG}= 50,140 kJ/kg, U.S. Department of energy, 2556) เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน สามารถแบ่งผลการทดลองได้ 2 ส่วน คือกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง และกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง เมื่อพิจารณาตามรูปแบบการทดลองที่ตั้งไว้พบว่า มีสัดส่วนแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่เป็นนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 เนื่องจากปริมาณของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดสอบนั้นคงที่ แล้วลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงตามปัจจัยควบคุมได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วรอบ และความเร็วลมมีอัตราใกล้เคียงกันเนื่องจากมีการปรับรูปร่างผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการรับความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

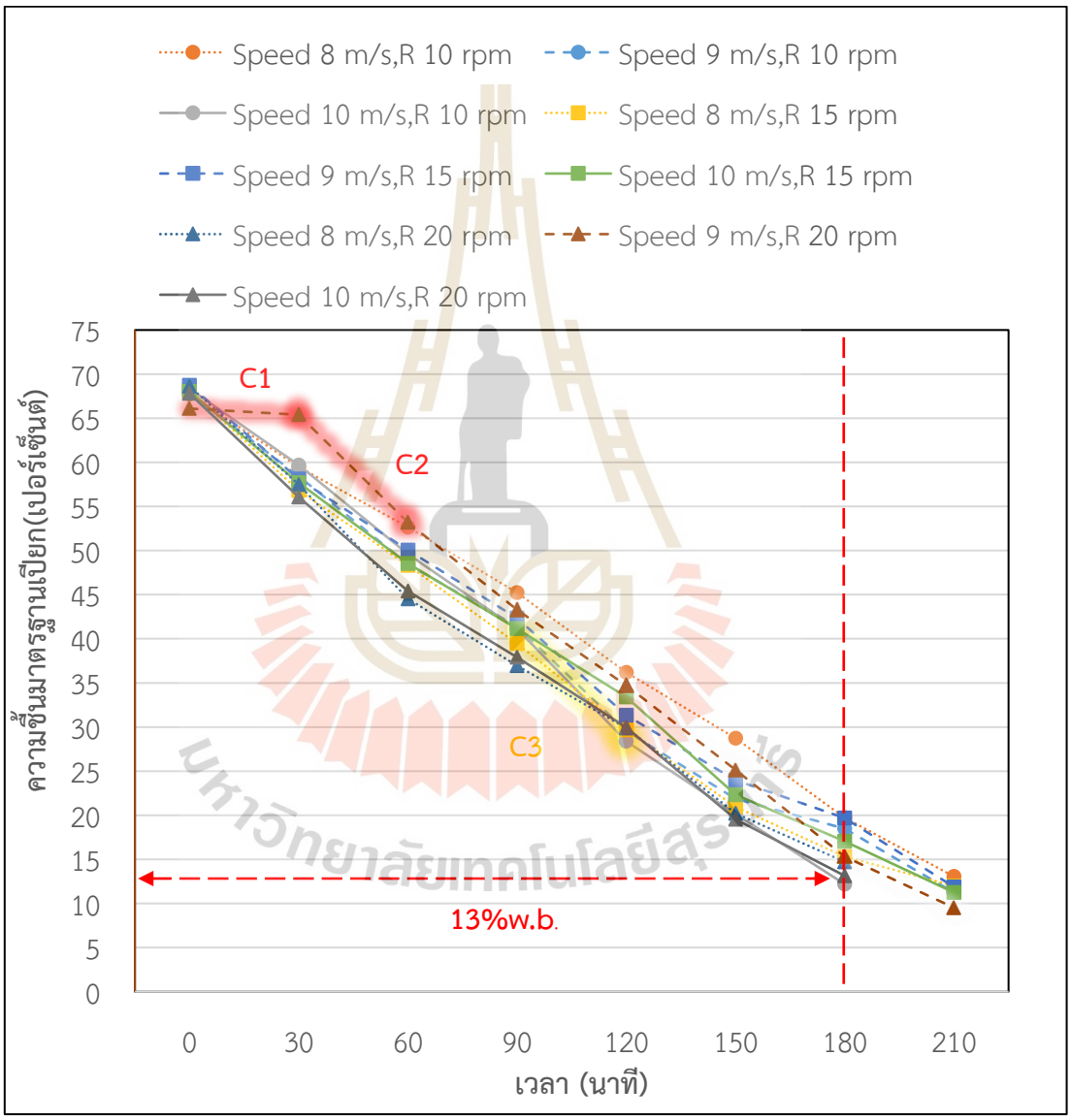


รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง



รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง

เมื่อพิจารณาความชื้นร่วมกับอุณหภูมิทุก 30 นาที พบว่า ณ อุณหภูมิ 80 กับ 90 องศาเซลเซียส ทุกค่าความเร็วรอบของตะแกรง และความเร็วลมของช่องหมุนเวียนความร้อนที่ทดสอบ พบว่าใช้ระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง ในการอบแห้งทำให้มีความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ (ธนธัช มุขขันธ์ และคณะ, 2552) แต่เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส พบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเหลือ 2.5 ชั่วโมงในทุกค่าตัวแปรควบคุม ในการทำให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นฐานเปียกเฉลี่ย 13.85 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8(A) สมรรถนะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลการทดลองอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ในช่วง (C1) 0-30 นาที เกิดสภาพวะ

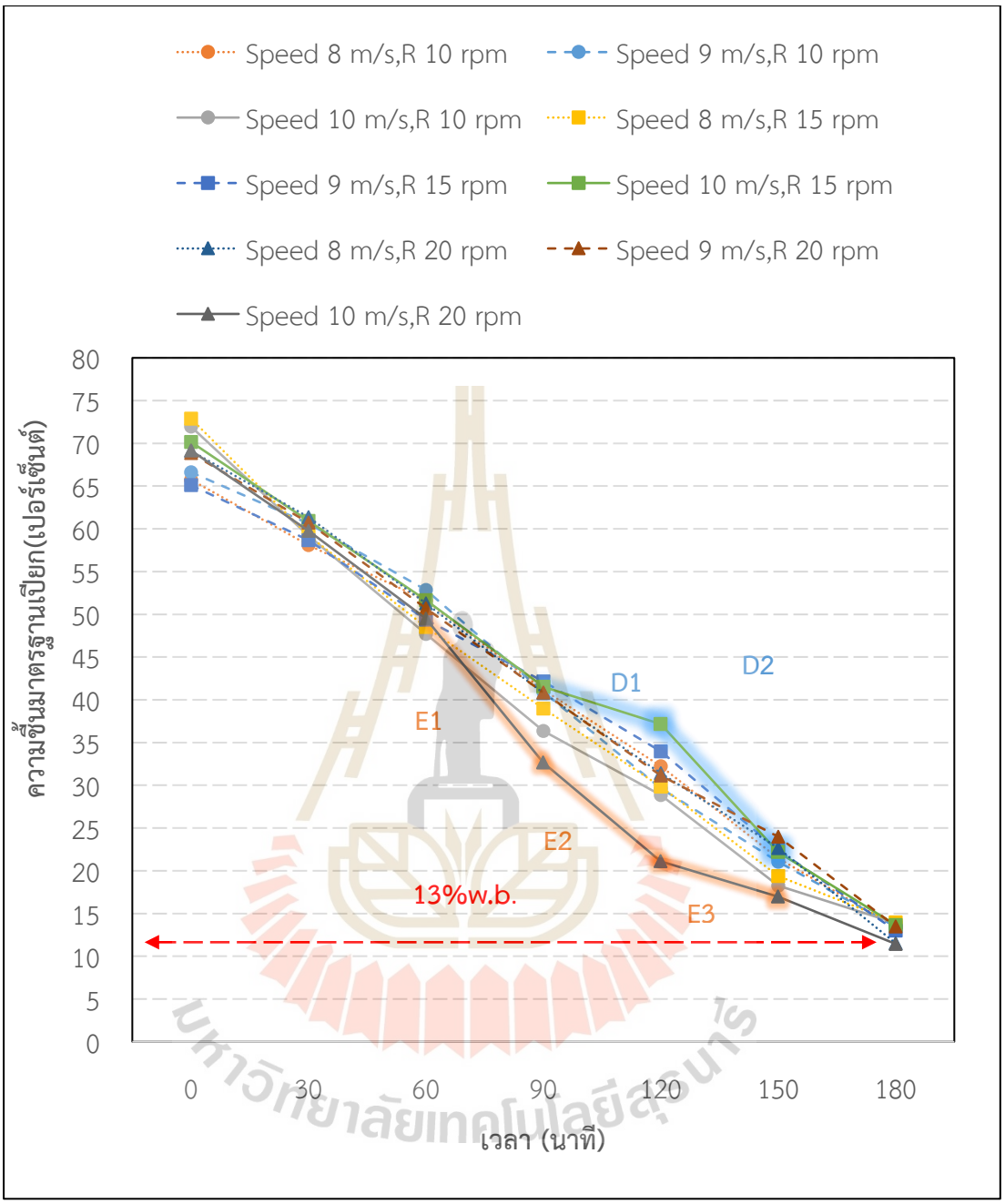
อัตราการอบแห้งต่ำกว่าค่าเฉลี่ย เนื่องจากการใช้กากมันสำปะหลังที่มีการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองและเปือกมันที่หลุดมาจากกระบวนก่อนหน้า (ขั้นตอนปอกและสับ Root chopper & rasper อ้างอิง James Bemiler & Roy Whistler, 2009) อยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อนำมารีดอัด (Extruding) ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เพื่อลดรีดน้ำ(Dewaters) ในการเปลี่ยนรูปร่างและปรับปรุงคุณสมบัติ ทำให้เปลือกกากมันไปแทรกในเนื้อของกากมัน ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่น้อยกว่าปกติ แต่จะเข้าสู่สภาวะปกติช่วง (C2) 30-60 นาที ต่อมา

ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ในช่วง (C3) 90-120 นาที มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกิดจากอุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) และอัตราการไหลของอากาศแวดล้อม (Surrounding Air Flow Rate) สูงกว่าค่าเฉลี่ย ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเข้าสู่สภาวะอัตราการอบแห้งคงที่เร็วขึ้นและสั้นกว่าค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4-3 ผลการอบแห้งที่ความเร็วลม และความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รายการ	**อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส**								
	ความเร็วลม 8 m/s			**ความเร็วลม 9 m/s**			**ความเร็วลม 10 m/s**		
	10 RPM	**15 RPM**	**20 RPM**	**10 RPM**	**15 RPM**	**20 RPM**	**10 RPM**	**15 RPM**	**20 RPM**
มวลกากที่ไม่ผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)	1.120	1.000	1.190	0.960	0.980	1.290	1.040	0.930	1.080
มวลกากที่ผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)	1.770	1.640	2.030	1.520	1.610	2.190	1.640	1.550	1.830
น้ำหนักน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม)	12.110	12.360	11.780	12.520	12.410	11.520	12.320	12.520	12.090
ปริมาณแก๊สที่ใช้อบแห้ง (กิโลกรัม)	0.960	0.920	0.910	0.970	0.930	0.880	0.775	0.970	0.9000
พลังงานไฟฟ้าที่อบแห้ง (kw)	0.794	0.781	0.688	0.769	0.779	0.845	0.651	0.776	0.671
SEC (MJ/kg_{water})	5.300	4.998	5.176	5.158	5.010	5.084	5.047	5.190	4.977
ระยะเวลาอบแห้ง (hr)	3.000	3.000	2.500	3.000	3.000	3.000	2.500	3.000	2.500
อัตราการอบแห้ง (kg/hr)	3.460	3.532	3.927	3.576	3.545	3.840	3.521	3.577	4.031

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย



รูปที่ 4.8(B) สมรรถนะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

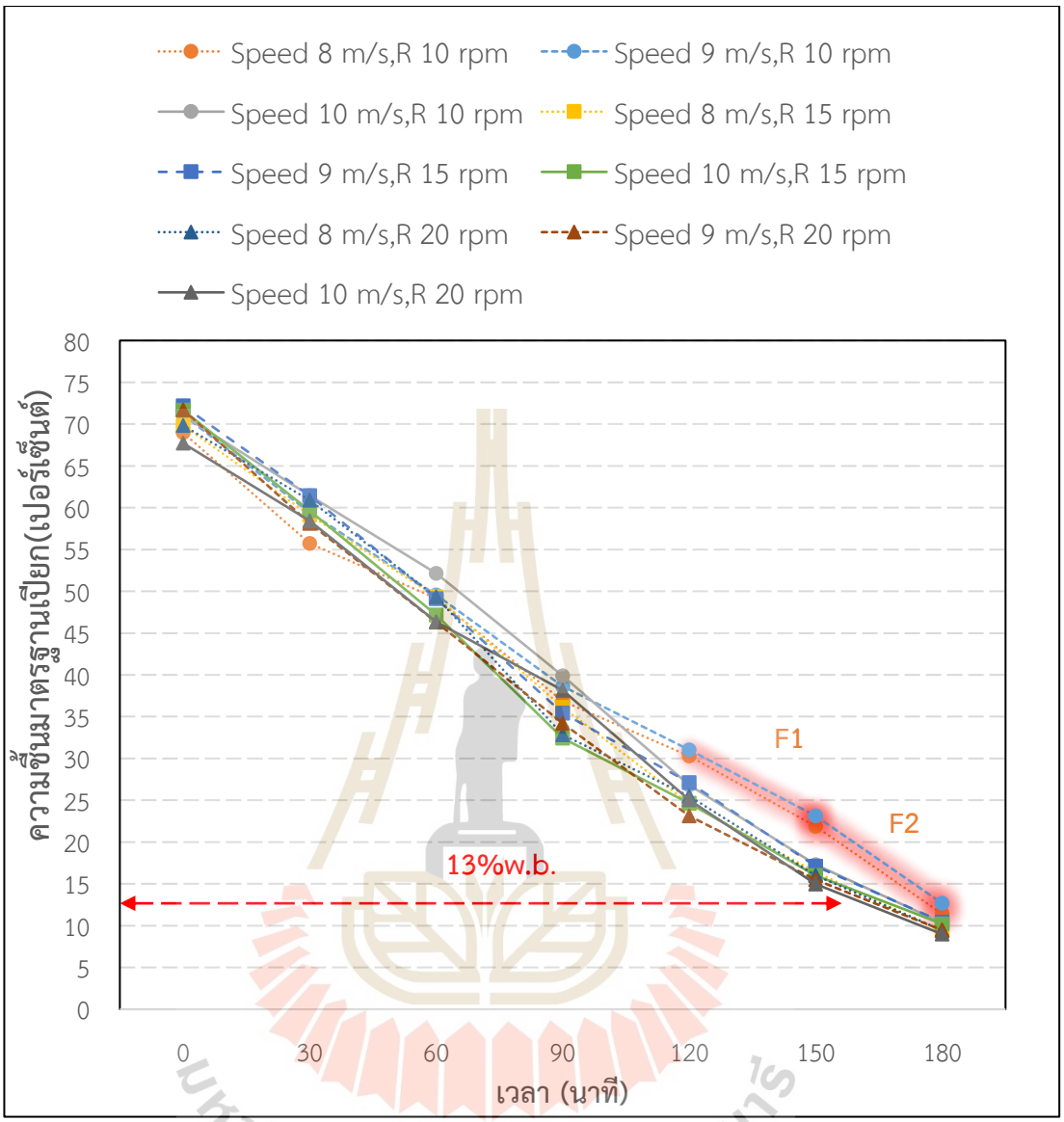
จากข้อมูลการทดลองอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 15 รอบต่อนาที ในช่วง (D1) 90-120 นาที มีอัตราการอบแห้งคงที่นานกว่าค่าเฉลี่ยและช่วง (D2) 120-150 นาที เข้าสู่สภาวะความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากสภาวะแวดล้อมที่มีมวลอากาศเย็นเข้าสู่ภายในเนื้อกากมันสำปะหลังจากพายุฤดูร้อน ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่น้อยกว่าปกติจากค่าเฉลี่ย

ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ในช่วง (E1) 60-90 นาที มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเกิดจากอุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นของบรรยากาศ และอัตราการไหลของอากาศแวดล้อมสูงกว่าค่าเฉลี่ย ส่งผลให้อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเข้าสู่สภาวะอัตราการอบแห้งคงที่เร็วขึ้นและสั้นกว่าค่าเฉลี่ย จนกระทั่งเข้าสู่ช่วง (E2) 60-90 นาที เกิดสภาวะความชื้นวิกฤต ที่ความชื้นภายในเนื้อกากมันสำหลังมีน้อยและอุณหภูมิภายในเนื้อกากมันสำหลังสูง และนำไปสู่ช่วง (E3) 60-90 นาที ที่มีอัตราการอบแห้งลดลง ตามลำดับ

ตารางที่ 4-4 ผลการอบแห้งที่ความเร็วลม และความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

รายการ	**อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส**								
	ความเร็วลม 8 m/s			**ความเร็วลม 9 m/s**			**ความเร็วลม 10 m/s**		
	10 RPM	15 RPM	20 RPM	10 RPM	15 RPM	20 RPM	10 RPM	15 RPM	20 RPM
มวลกากที่ไม่ผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)	1.140	1.060	0.890	1.130	1.110	1.050	1.080	1.080	0.880
มวลกากที่ผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)	1.920	1.810	1.610	1.900	1.890	1.890	1.820	1.840	1.600
น้ำหนักน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม)	11.940	12.130	12.500	11.970	12.000	12.060	12.100	12.080	12.520
ปริมาณแก๊สที่ใช้อบแห้ง (กิโลกรัม)	0.830	0.840	0.850	0.790	0.840	0.850	0.815	0.840	0.820
พลังงานไฟฟ้าที่อบแห้ง (kw)	0.671	0.663	0.663	0.670	0.671	0.672	0.663	0.671	0.648
SEC (MJ/kg_{water})	5.577	5.555	5.404	5.295	5.616	5.654	5.555	5.578	5.254
ระยะเวลาอบแห้ง (hr)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
อัตราการอบแห้ง (kg/hr)	3.978	4.042	4.167	3.991	4.001	4.020	4.035	4.026	4.172

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย



รูปที่ 4.8(C) สมรรถนะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลการทดลองอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ในช่วง (F1) 120-150 นาที มีอัตราการอบแห้งน้อยกว่าค่าเฉลี่ย เนื่องจากเข้าสภาวะอัตราอบแห้งคงที่ช้าและนานกว่าค่าเฉลี่ย ที่เกิดจากปัจจัยแวดล้อมที่มีมวลอากาศเย็นเข้ามาภายในเนื้อกากมันสำปะหลังขณะที่อยู่ในสภาวะความชื้นวิกฤต ส่งผลให้ช่วง (F2) 120-150 นาที มีอัตราการอบแห้งลงลดอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4-5 ผลการอบแห้งที่ความเร็วลม และความเร็วรอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

รายการ	อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส								
	ความเร็วลม 8 m/s			ความเร็วลม 9 m/s			ความเร็วลม 10 m/s		
	10 RPM	15 RPM	20 RPM	10 RPM	15 RPM	20 RPM	10 RPM	15 RPM	20 RPM
มวลกากที่ไม่ผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)	0.920	0.690	0.610	0.990	0.740	0.600	0.810	0.730	0.600
มวลกากที่ผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)	1.560	1.310	1.420	1.680	1.430	0.600	1.370	1.410	1.390
น้ำหนักน้ำที่ระเหย (กิโลกรัม)	12.520	13.000	12.970	12.330	12.830	13.020	12.820	12.860	13.010
ปริมาณแก๊สที่ใช้อบแห้ง (กิโลกรัม)	0.910	0.890	0.870	0.885	0.875	0.895	0.870	0.890	0.895
พลังงานไฟฟ้าที่อบแห้ง (kw)	0.640	0.619	0.625	0.650	0.628	0.629	0.626	0.630	0.623
SEC (MJ/kg_{water})	5.831	5.492	5.381	5.758	5.471	5.515	5.44	5.552	5.519
ระยะเวลาอบแห้ง(hr)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
อัตราการอบแห้ง(kg/hr)	4.173	4.333	4.323	4.110	4.276	4.340	4.272	4.287	4.337

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

เมื่อพิจารณาสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งเฉลี่ย ณ อุณหภูมิ ความเร็วรอบของตะแกรงหมุน และความเร็วลมมาวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ด้วยโปรแกรม Excel ,SPSS และMini tab ดังตารางที่ 4.6(C) สามารถสรุปตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้งอย่างเป็นนัยสำคัญ (P-Value <0.05) ได้แก่ อุณหภูมิห้องอบมีค่า P-Value เท่ากับ $6.75x10^{-12}$ ความเร็วรอบมีค่า P-Value เท่ากับ $8.24x10^{-5}$ และความเร็วลมมีค่า P-Value เท่ากับ 0.43 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-6(A) ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง

Regression Statistics	
Multiple R	0.943
R Square	0.890
Adjusted R Square	0.875
Standard Error	0.101
Observations	27.000

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4-6(B) ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3.0000	1.8836	0.6279	61.8111	3.6734×10^{-11}
Residual	23.0000	0.2336	0.0102		
Total	26.0000	2.1172			

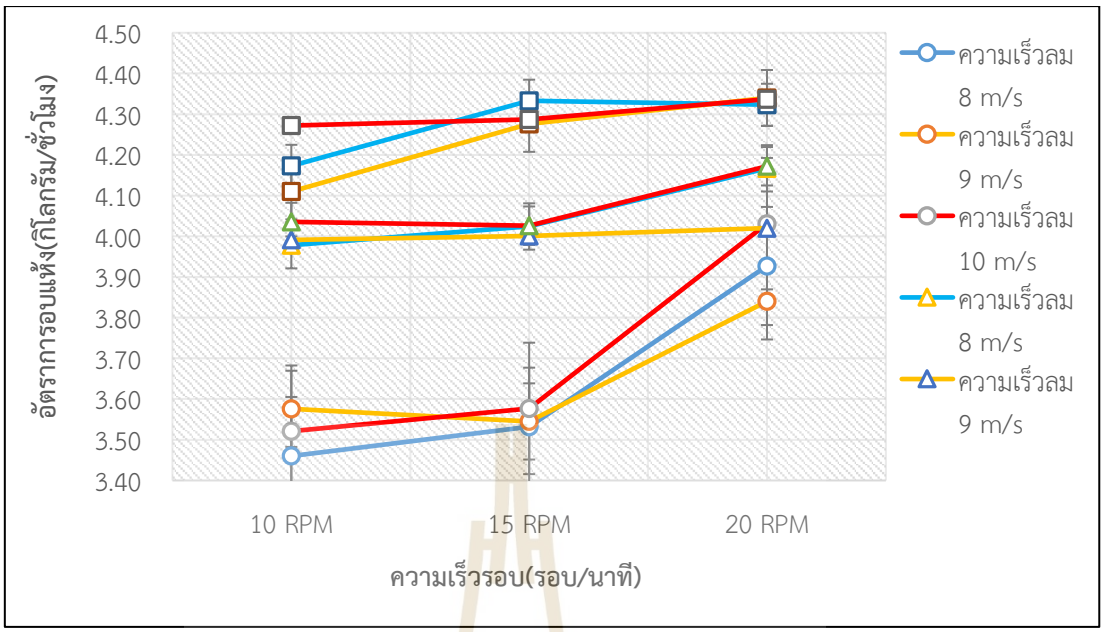
*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4-6(C) ตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง

Variable	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0.7634	0.3112	2.4526	0.0222
Temp	0.0302	0.0024	12.7293	6.7479×10^{-12}
Speed	0.0189	0.0238	0.7975	0.4333
RPM	0.0227	0.0048	4.7709	8.2413×10^{-5}

*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

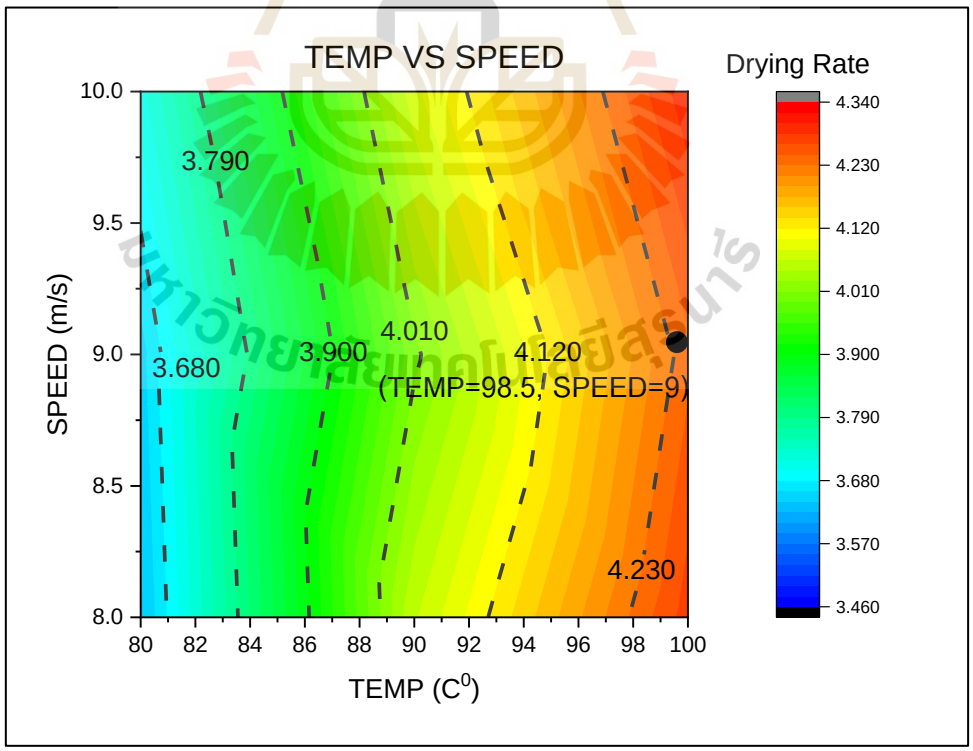
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



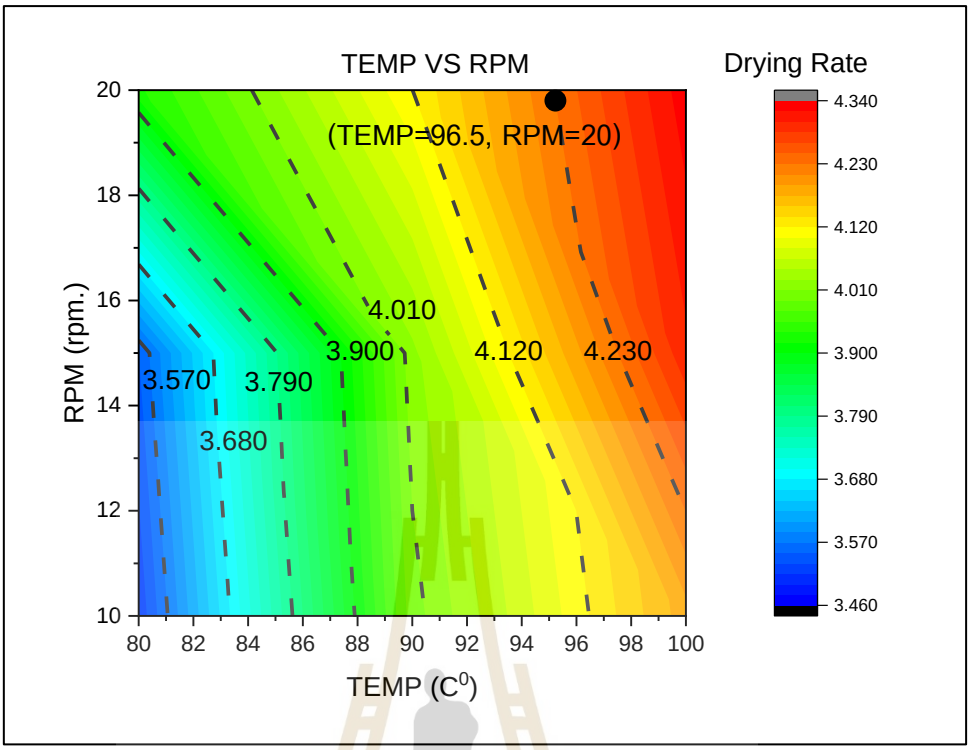
*ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

หมายเหตุ :พิจารณาจากอุณหภูมิ 80 90 และ100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

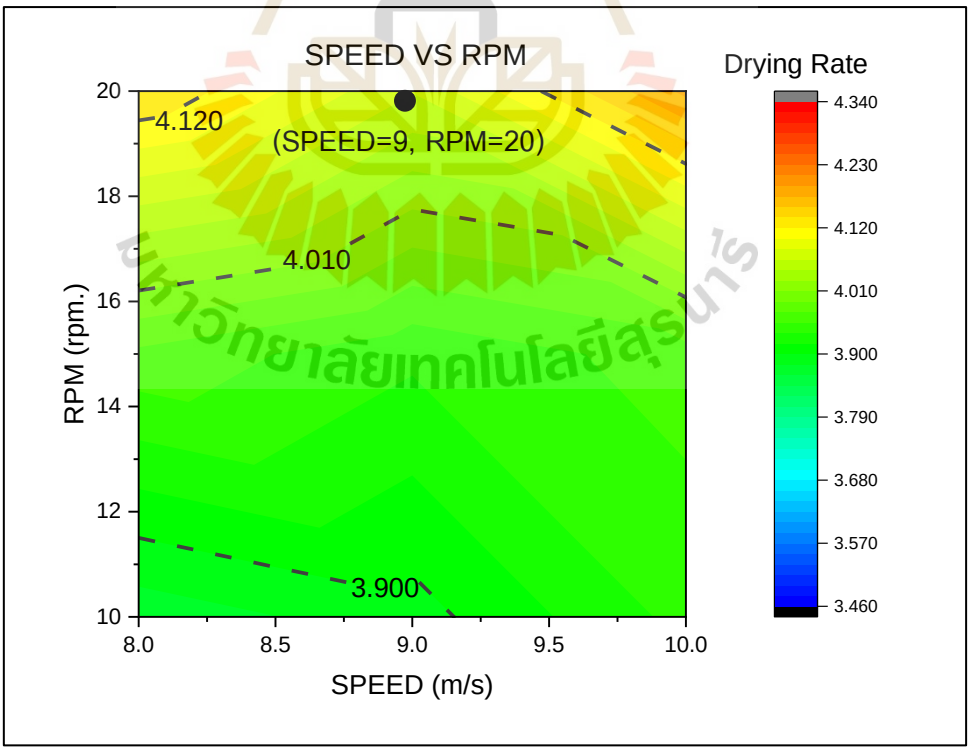
รูปที่ 4.9 สมรรถนะการอบแห้ง



รูปที่ 4.9(A) สมรรถนะการอบแห้ง (เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ กับความเร็วลม)



รูปที่ 4.9(B) สมรรถนะการอบแห้ง (เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ กับความเร็วรอบ)

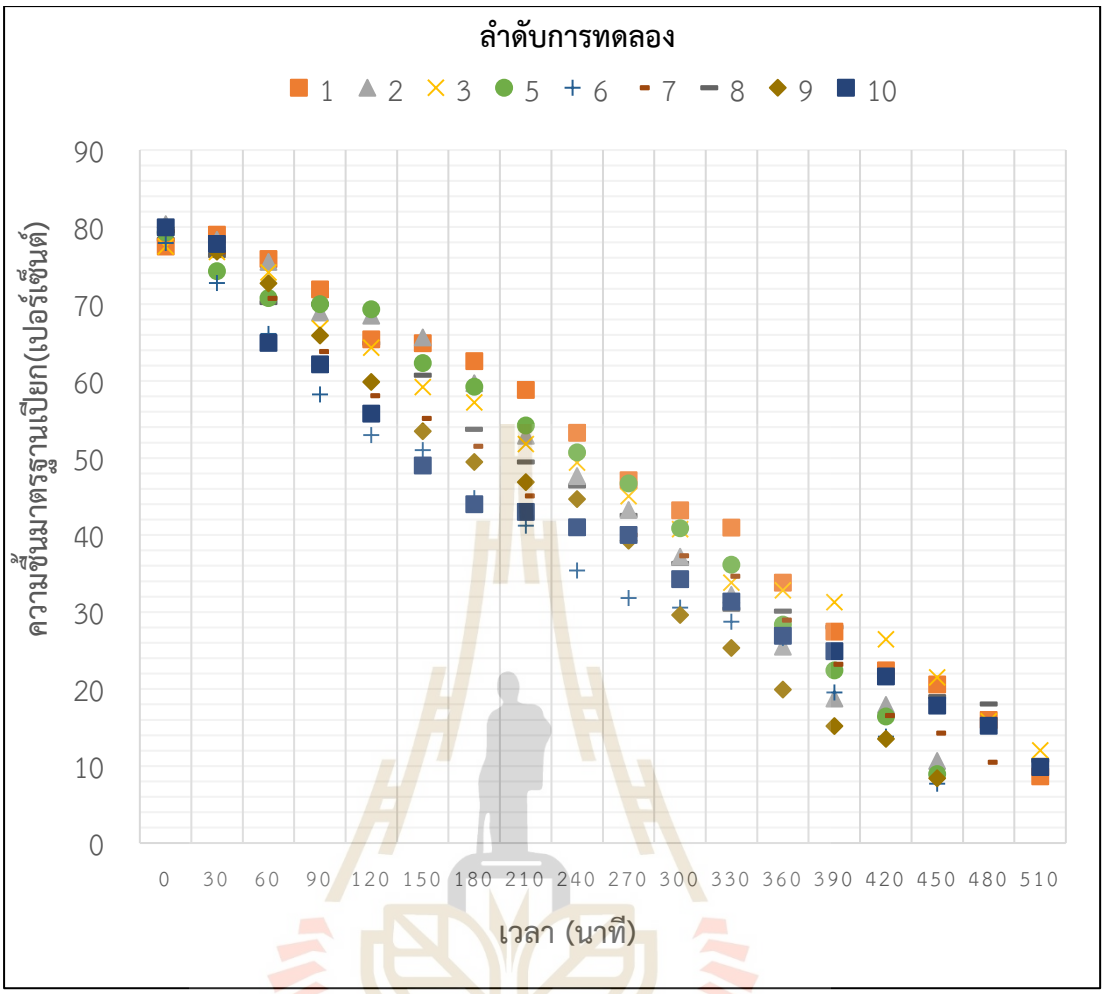


รูปที่ 4.9(C) สมรรถนะการอบแห้ง (เปรียบเทียบระหว่างความเร็วลม กับความเร็วรอบ)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่มีค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ย 68.97 w.b. อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 9 เมตรต่อวินาทีและความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 20 รอบต่อวินาที เนื่องจากมีสมรรถนะอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 4.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณแก๊สที่ใช้อบแห้ง 0.90 กิโลกรัมต่อรอบ พลังงานไฟฟ้าที่อบแห้ง 0.63 กิโลวัตต์ต่อรอบ ค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะเท่ากับ 5.52 MJ/kg_{water} เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการลดความชื้นด้วยการตากลานปูนความหนา 5 มิลลิเมตร (ทดสอบในเดือน มกราคม และกุมภาพันธ์) โดยอุณหภูมิเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส ณ สถานที่การทำการทดลอง และใช้เวลาเฉลี่ย 7.5 ชั่วโมงในการอบแห้งทำให้มีความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 13 w.b. (ธนธัช มุขขันธ์ และคณะ, 2552) ผลที่ได้คือมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 1.80 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน และอบแห้งด้วยวิธีธรรมชาตินั้นมีอัตราการอบแห้งในแต่ละช่วงเวลาไม่คงที่เนื่องจากการสูญเสียน้ำในแต่ละช่วงนั้นไม่เท่ากัน

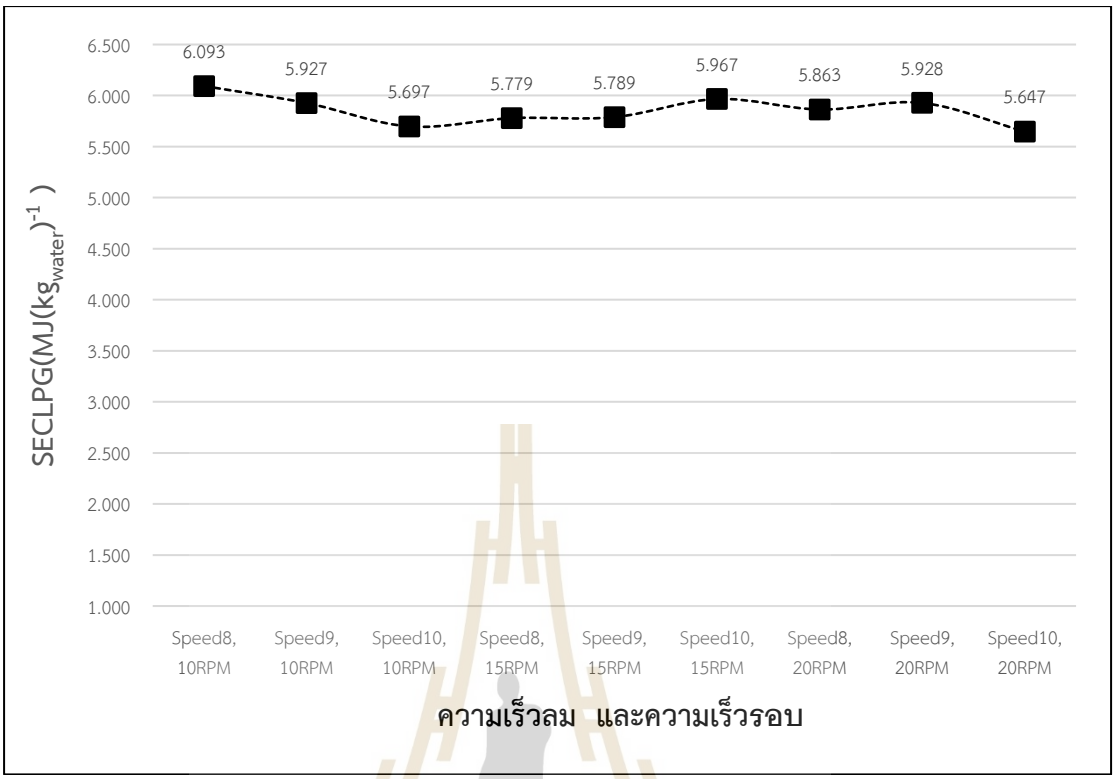
โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยวิธีธรรมชาตินั้นต้องพึ่งพาความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ ทีมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลา อีกทั้งยังมีการปนเปื้อนในกาศ และปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการทดลองอบแห้งนั้นจะมีประสิทธิภาพของอัตราการอบแห้งสูงสุด เนื่องด้วยน้ำจากวัสดุสามารถระเหยได้ง่าย และมีปริมาณมากหลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากน้ำในผิววัสดุระเหยออกไปหมดแล้วแต่ยังคงหลงเหลือเพียงแต่น้ำที่อยู่ด้านในเนื้อวัสดุที่ระเหยออกมาได้ยากกว่าชั้นผิวด้านนอก จึงต้องใช้ค่าพลังงานมากกว่า อย่างไรก็ดีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน ในช่วงท้ายกระบวนการนั้นมีประสิทธิภาพของอัตราการอบแห้งมากกว่าในทุกช่วงกระบวนการเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีธรรมชาติโดยการตากลาน เนื่องจากภายในตู้อบแห้งสามารถควบคุมและสะสมพลังงานความร้อนอีกทั้งยังสามารถลดการปนเปื้อนจากอากาศแวดล้อม จึงส่งผลให้น้ำภายในเนื้อวัสดุระเหยอย่างต่อเนื่องและลดตัวแปรแวดล้อมที่อาจส่งผลต่ออัตราการอบแห้งได้ จากกราฟจะแสดงให้เห็นการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนนั้นมีสมรรถนะการอบแห้งสูงกว่าในด้านอัตราการอบแห้งสูงสุดและระยะเวลาโดยรวมตลอดการอบแห้ง เพื่อให้ได้ความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 14 w.b. นั้นดีกว่าถึงร้อยละ 241 และ300 ตามลำดับ

ในอนาคตอาจมีการเพิ่มขนาดถังและเปลี่ยนรูปแบบการถ่ายโอนความร้อนด้วยวิธีการอื่นเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต และประสิทธิภาพการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น ในด้านต้นทุนการอบแห้ง (ประจำปี 2663) ราคากากมันสำปะหลัง อยู่ที่ 150 บาท ต่อตัน (0.15 บาทต่อกิโลกรัม) ค่าพลังงานไฟฟ้า 4 บาทต่อหน่วย แก๊สหุงต้มถัง 48 กิโลกรัม 1,119 บาท (23.31 บาทต่อกิโลกรัม) ต้นทุนต่อรอบเท่ากับ 26.72 บาทต่อรอบ หรือ 13.50 บาทต่อกิโลกรัม สูงกว่าวิธีธรรมชาติ (2.25 บาทต่อรอบ) ที่ไม่มีต้นทุนทางด้านพลังงาน 24.47บาท ต่อรอบ หรือคิดเป็นร้อยละ 1,187.56

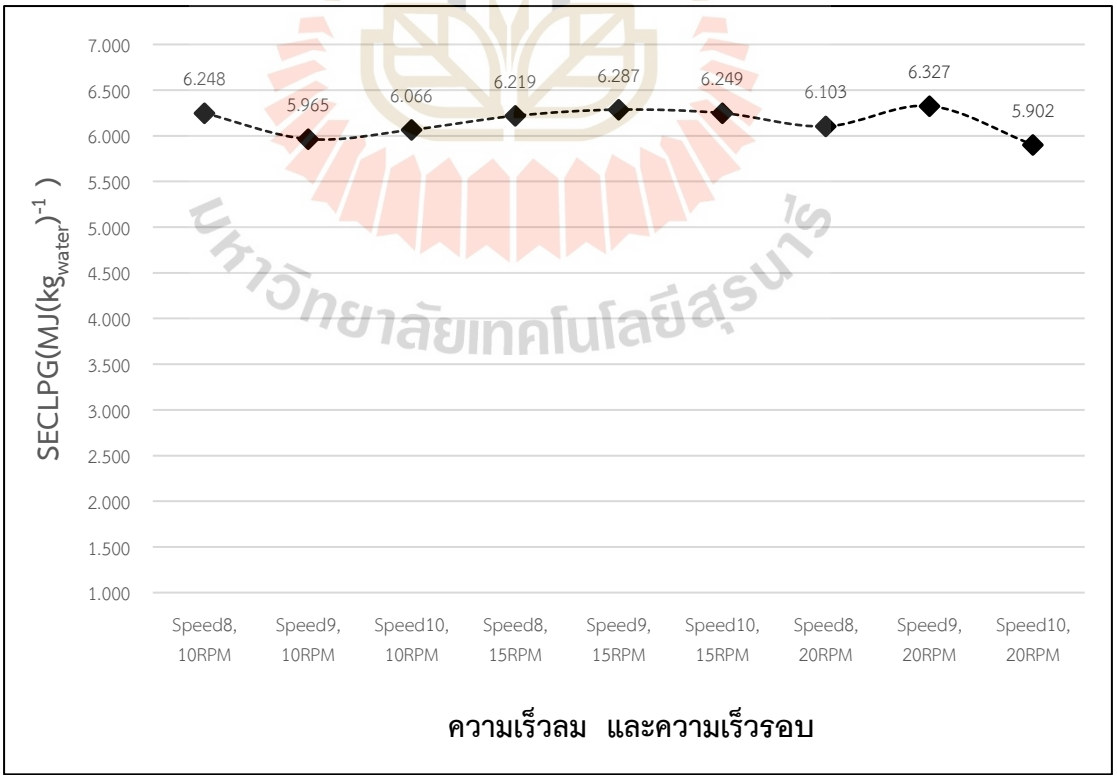


รูปที่ 4.10 ลดความชื้นด้วยการตากลานปูน

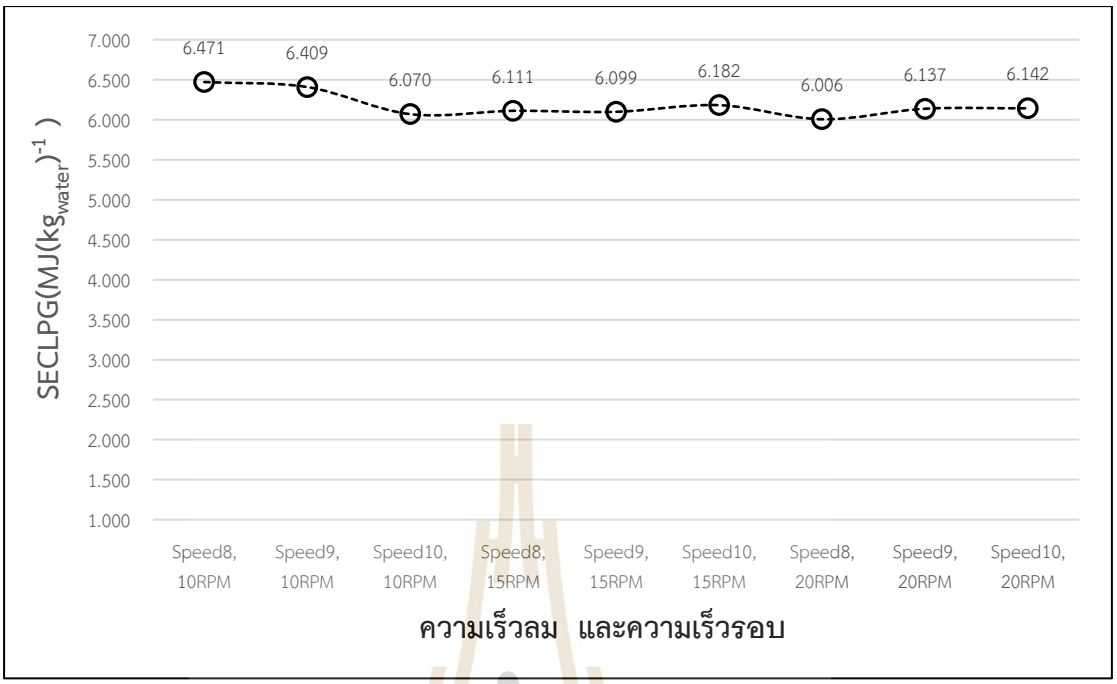
เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ที่อุณหภูมิ 80 90 และ100 องศาเซลเซียส ความเร็วลมที่ 8, 9 และ10 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 10, 15 และ20 รอบต่อนาที อบแห้งจนกระทั่งค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 13 w.b. (มวลของกากมันสำปะหลังที่หายไปเท่ากับ 12.17 กิโลกรัม) เพิ่มขึ้นตามลำดับ รูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11(A) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

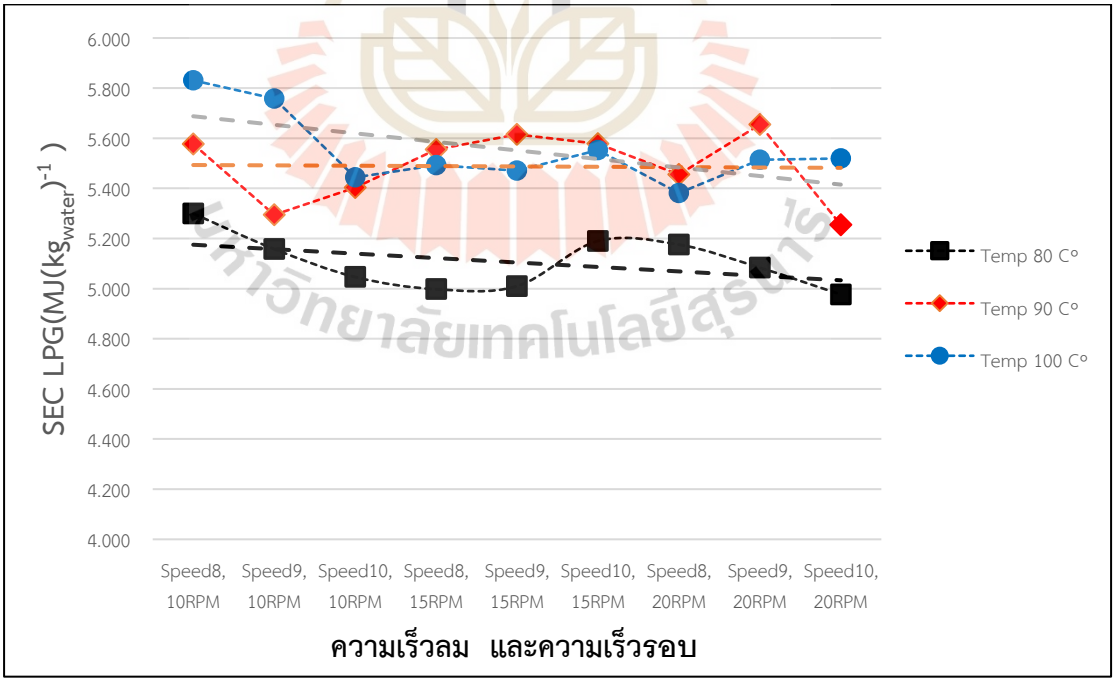


รูปที่ 4.11(B) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11(C) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

โดยเมื่อนำค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนของแต่ละค่าความร้อนในการทดลองมาพิจารณาร่วมกับ ความเร็วลม และความเร็วรอบถังคลีบตะแกรง รูปที่ 4.12



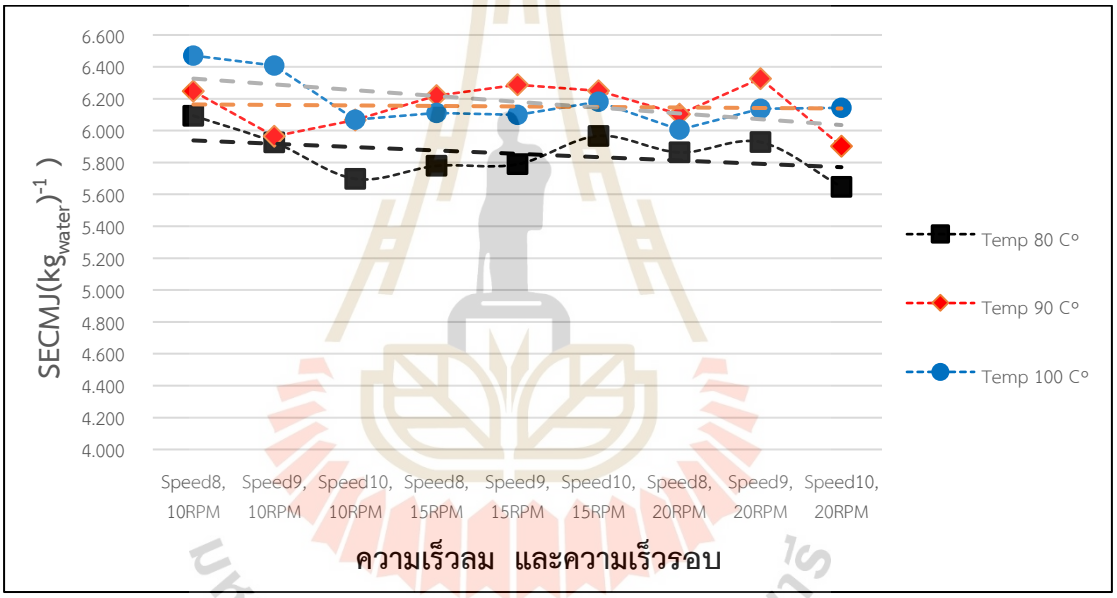
รูปที่ 4.12 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

โดยทุกช่วงอุณหภูมิในการทดลองการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส นั้นใช้ระยะเวลาอบแห้งที่ 3 ชั่วโมง ยกเว้นอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที

และความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ที่ใช้เวลาอบแห้งที่ 2.5 ชั่วโมง ในการทำให้ค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 13 w.b. สาเหตุจากการได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกระบบ จึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนลงลดเล็กน้อย

ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที พบว่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น สาเหตุจากการได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกระบบ จึงต้องปรับปริมาณแก๊สหุงต้มเพิ่มขึ้น เพื่อได้อุณหภูมิที่ตั้งวัตถุประสงค์ไว้

เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากความเร็วลม และความเร็วรอบ รูปที่ 4.13 พบว่าค่าความสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากตัวแปรแวดล้อมไม่ส่งผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าอย่างเป็นนัยสำคัญ



รูปที่ 4.13 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

4.3 ผลการทดลองการนำไปใช้เพื่อการลดต้นทุนเป็นอาหารสัตว์ทดแทน

ใช้กากมันสำปะหลังแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังจากภาคครัวเรือน ที่ค่าความชื้นฐานเปียกต่ำกว่า 13 w.b. (ยุวเรศและคณะ, 2550) โดยพิจารณาจากอัตราการอบแห้งสูงสุดที่ 4.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณแก๊สที่ใช้อบแห้ง 0.90 กิโลกรัมต่อรอบ พลังงานไฟฟ้าที่อบแห้ง 0.63 กิโลวัตต์ต่อรอบ ค่าความสิ้นเปลืองจำเพาะเท่ากับ 5.52 MJ/kg$_{water}$ ได้กากมันสำปะหลังแห้งรอบละ 2.00 กิโลกรัมต่อรอบ เท่ากับ 26.72 บาทต่อรอบ หรือ 13.50 บาทต่อกิโลกรัม โดยราคาค้าปลีกประจำปี 2663 อยู่ที่ 20 – 23 บาทต่อกิโลกรัม

4.3.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ

ทดสอบโดยใช้ผสมสูตรอาหารไก่พันธุ์เนื้ออายุ 1-17 วัน สามารถใช้กากมันสำปะหลังที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ และในช่วง 18-45 วัน สามารถใช้กากมันสำปะหลังที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ อัตราการให้อาหารต่อวัน สำหรับเลี้ยงไก่พันธุ์ (ไก่กระทง) เนื้อจำนวน 100 ตัว (ผศ.ดร.ประภากร ธาราฉาย , 2560) โดยพิจารณาร่วมกับสมรรถนะในการทำงานเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน ตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ราคาต้นทุนการใช้อาหารไก่พันธุ์เนื้อร่วมกับกากมันสำปะหลัง

รายการ	อายุ(สัปดาห์)	
	1 ถึง 3	4 ถึง 8
ต้นทุนราคาอาหาร (บาท ต่อกิโลกรัม)	26.00	18.00
ปริมาณอาหารที่ไก่กิน (กิโลกรัม)	13.00	75.00
สัดส่วนที่ใช้กากมันสำปะหลัง (เปอร์เซ็นต์)	5.00	10.00
สัดส่วนที่ใช้กากมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	0.65	7.50
ต้นทุนราคากากมันสำปะหลัง (บาท)	8.78	101.25
ต้นทุนอาหารสุทธิ (บาท)	338.00	1350.00
ต้นทุนอาหารสุทธิ (บาท)*	329.88	1316.25
ต้นทุนอาหารที่ลดลง(บาท)	8.13	33.75
ต้นทุนที่ลดลงอาหาร(บาท ต่อ กิโลกรัม)	0.63	0.45
เพียงพอต่อการเลี้ยง(ตัวต่อวัน)**	2437.00	211.00

หมายเหตุ: *ใช้กากมันสำปะหลังผสมอาหารไก่พันธุ์เนื้อ

**ความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์ทดแทน

ที่มา: ผศ.ดร.ประภากร ธาราฉาย(2560)

ผลที่ได้พบว่าไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต เมื่อพิจารณาในด้านการลดต้นทุนอาหารสัตว์ทดแทน พบว่า เมื่อนำอาหารไก่พันธุ์เนื้อในช่วง 3 สัปดาห์ เบทาโกร 203A ราคากิโลกรัมละ 26 บาท ผสมกับกากมันสำปะหลังที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ และในช่วง 4-8 สัปดาห์ เบทาโกร 204 ราคากิโลกรัมละ 18 บาท ผสมกับกากมันสำปะหลังที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์

สรุปได้ว่าการใช้กากมันสำปะหลังในการผสมอาหารสัตว์ทดแทนสำหรับไก่พันธุ์เนื้อกับกลุ่มทดสอบ ไก่กระทง จำนวน 100 ตัว โดยต้นทุนอาหารพันธุ์เนื้อสุทธิต่อรอบ (8 สัปดาห์) 1,688 บาท เมื่อใช้กากมันสำปะหลังในการผสมอาหารสัตว์ทดแทนจะสามารถลดต้นทุนสุทธิต่อรอบได้ 1646.13 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 2.48 ของราคาอาหารทั้งหมด

4.3.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ

ทดสอบโดยใช้สูตรผสมสูตรอาหารปลากินพืชผสมกากมันสำปะหลัง 25 เปอร์เซ็นต์ จำนวนกลุ่มตัวอย่างทดลอง 100 ตัว ตารางที่ 4-8 (ศูนย์เรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียง ต.ธารปราสาท อ.โนนสูง จังหวัดนครราชสีมา)

ตารางที่ 4-8 ราคาต้นทุนการใช้อาหารปลากินพืชร่วมกับกากมันสำปะหลัง

รายการ	อายุ(สัปดาห์)					
	3 ถึง 5	6 ถึง 9	10 ถึง 13	14 ถึง 15	16 ถึง 17	18 ถึง 21
ต้นทุนราคาอาหาร (บาท ต่อกิโลกรัม)	18.50	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
ปริมาณอาหาร (กิโลกรัม)	44.80	47.95	77.70	42.70	34.30	67.20
สัดส่วนที่ใช้กากมันสำปะหลัง (เปอร์เซ็นต์)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
สัดส่วนที่ใช้กากมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	11.20	11.99	19.43	10.68	8.58	16.80
ต้นทุนอาหารสุทธิ (บาท)	829.00	959.00	1,554.00	854.00	686.00	1,344.00
ต้นทุนอาหารสุทธิ (บาท)*	772.80	881.08	1,427.74	784.61	630.26	1234.80
ต้นทุนอาหารที่ลดลง(บาท)	17.25	18.38	18.38	18.38	18.38	18.38
ต้นทุนที่ลดลงอาหาร(บาท ต่อกิโลกรัม)	1.25	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
เพียงพอต่อการเลี้ยง(ตัวต่อวัน)**	990.00	925.00	571.00	1039.00	1293.00	660.00

หมายเหตุ: *ใช้กากมันสำปะหลังผสมอาหารปลากินพืช

**ความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์ทดแทน

ผลที่ได้พบว่าไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต เมื่อพิจารณาในด้านการลดต้นทุนอาหารสัตว์ทดแทน กำหนดให้ใช้อาหารปลากินพืชวัยอ่อน (3 สัปดาห์) เบทาโกร 842 ราคา กิโลกรัม

ละ 18 บาท และอาหารปลากินพืช (4สัปดาห์ขึ้นไป) เบทาโกร 843 ราคา กิโลกรัมละ 20 บาท ผสมกับกากมันสำปะหลังที่ระดับ 25 เปอร์เซ็นต์

สรุปได้ว่าการใช้กากมันสำปะหลังในการผสมอาหารสัตว์ทดแทนสำหรับปลากินพืชกับกลุ่มทดสอบ ปลานิลขาววัยอ่อน (3 สัปดาห์) จำนวน 100 ตัว เป็นระยะเวลา 18 สัปดาห์ (อายุ 21 สัปดาห์) โดยปริมาณอาหาร 315 กิโลกรัม ต้นทุนอาหารพันธุ์เนื้อสุทธิต่อรอบ 6,226 บาท หรือ 19.79 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อใช้กากมันสำปะหลังในการผสมอาหารสัตว์ทดแทนต้นทุนสุทธิต่อรอบได้ 5,731 บาท หรือ 18.21 บาทต่อกิโลกรัม สามารถลดต้นทุนอาหารร้อยละ 8 ของราคาอาหารทั้งหมด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง

กากมันสำปะหลังสดจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา จากกระบวนการแยกกากหยาบกากละเอียดเก็บตัวอย่างการทดลอง 30 นาทีหลังออกจากกระบวนการ จะมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว และมีการจับตัวเป็นก้อนผสมกัน มีค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 77.75 w.b.เมื่อนำกากมันสำปะหลังสดมาลดความชื้นทางกล (เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เครื่องต้นแบบ) พบว่ามีค่าความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 68.97 w.b. มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว และมีการจับตัวเป็นก้อนผสมกันแต่มีขนาดเล็กลง

5.2 การทดสอบด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลัง เครื่องต้นแบบ

5.2.1 การศึกษาทดลองหาอุณหภูมิ ความเร็วรอบและความเร็วลมหมุนเวียนที่เหมาะสม

โดยทำการศึกษาทดลองอบแห้งกากมันสำปะหลังรอบละ 15 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 29.63 ของปริมาณถังอบแห้งทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 80 ,90 และ100 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 10 ,15 และ20 รอบต่อนาที ความเร็วลมหมุนเวียน 8 ,9 และ10 เมตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และระยะเวลาในการทำงาน (ทดสอบในเดือน มกราคม และกุมภาพันธ์) อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส ณ สถานที่ทำการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ความเร็วลมหมุนเวียน 9 เมตรต่อวินาที เนื่องด้วยมีค่าสมรรถนะอัตราการอบแห้งแหมาะสมที่สุด คือ 4.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความสิ้นเปลืองจำเพาะเท่ากับ 5.52 MJ/kg_{water} ระยะเวลาในการอบแห้ง 2.5 ชั่วโมง ในการอบแห้งทำให้มีความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 13 w.b. (เชิงอุสาหกรรม) กากมันสำปะหลังแห้งที่ได้สามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ 1.อยู่ในตะแกรงสัดส่วนเฉลี่ย 69.94 เปอร์เซ็นต์ 2.ลอดผ่านรูตะแกรงสัดส่วน 30.06 เปอร์เซ็นต์

5.2.2 การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ กับการตากลานปูน

โดยทำการศึกษาการลดความชื้นด้วยการตากลานปูน โดยทำการศึกษาทดลองรอบละ 15 กิโลกรัม ความหนาที่ใช้ตาก 5 มิลิเมตรโดยเฉลี่ย ทำการทดสอบในช่วงเดือนมกราคม และเดือนกุมภาพันธ์ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 73 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส ณ สถานที่ทำการทดลอง พบว่ามีสมรรถนะอัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.80 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ระยะเวลาเฉลี่ย 7.5 ชั่วโมง ในการอบแห้งทำให้มีความชื้นฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 14 w.b.(เชิงการค้า) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการอบแห้งสูงสุดของเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน เครื่องต้นแบบ จะมีสมรรถนะในด้านอัตราการอบแห้งสูงกว่าร้อยละ 241 เปอร์เซ็นต์ และในด้านระยะเวลาร้อยละ 300 เปอร์เซ็นต์

5.2.3 ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับภาคครัวเรือน

โดยทำการศึกษาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนรอบละ 15 กิโลกรัม ผลจากการทดสอบพบว่าตัวแปรควบคุมที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างเป็นนัยสำคัญโดยเรียงลำดับดังนี้ 1.อุณหภูมิ($P=6.75x10^{-12}$) 2.ความเร็วรอบ($P=8.24x10^{-5}$) 3.ความเร็วลม($P=0.43$) พบว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ความเร็วลมหมุนเวียน 9 เมตรต่อวินาที เนื่องด้วยมีค่าสมรรถนะการอบแห้งเหมาะสมที่สุดคือ 0.63 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะได้กากมันสำปะหลังแห้งรอบละ 1.98 กิโลกรัมต่อรอบหรือ 15.84 กิโลกรัมต่อวัน (ร่วมระยะเวลาเตรียมกระบวนการ 3 ชั่วโมงโดยประมาณ) ทุนต่อรอบเท่ากับ 26.72 บาทต่อรอบ หรือ 13.50 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาค้าปลีกประจำปี 2663 อยู่ที่ 20 – 23 บาทต่อกิโลกรัม)

5.2.3.1 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารไก่พันธุ์เนื้อ

โดยใช้อาหารในอัตราส่วนอาหารไก่พันธุ์เนื้อหรือไก่กระทง เบทาโกร 203A และเบทาโกร 204แบ่งได้ 2 ช่วงได้แก่ ช่วงอายุ 1-3 สัปดาห์ ใช้อาหารเบทาโกร 203A 9.5 ส่วน กับกากมันสำปะหลัง 0.5 ส่วน เพียงพอต่อการเลี้ยงไก่ 2,437 ตัวต่อวัน และในช่วงอายุ 4-8 สัปดาห์ ใช้อาหารเบทาโกร 204 9 ส่วนผสมกับกากมันสำปะหลัง 1 ส่วน เพียงพอต่อการเลี้ยงไก่ 211 ตัวต่อวัน สามารถลดต้นทุนค่าอาหารได้ 2.48 เปอร์เซ็นต์ ของราคาอาหารทั้งหมด

5.2.3.2 การใช้กากมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์น้ำ

โดยใช้สูตรอาหารในอัตราส่วนอาหารของปลานิลขาวแปลงเพศ ได้แก่ ปลาป่น 1 ส่วน รำละเอียด 1 ส่วน กากมันสำปะหลัง 2 ส่วน ผสมกับอาหารสัตว์น้ำ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 6 ช่วงอายุของปลา คือ 1. ช่วงอายุ 3-5 สัปดาห์ เพียงพอต่อปลา 990 ตัวต่อวัน 2. ช่วงอายุ 6-9 สัปดาห์ เพียงพอต่อปลา 925 ตัวต่อวัน 3. ช่วงอายุ 10-13 สัปดาห์ เพียงพอต่อปลา 571 ตัวต่อวัน 4. ช่วงอายุ 14-15 สัปดาห์ เพียงพอต่อปลา 1,039 ตัวต่อวัน 5. ช่วงอายุ 16-17 สัปดาห์ เพียงพอต่อปลา 1,293 ตัวต่อวัน 6. ช่วงอายุ 18-21 สัปดาห์ เพียงพอต่อปลา 660 ตัวต่อวัน สามารถลดต้นทุนค่าอาหารได้ 8 เปอร์เซ็นต์ ของราคาอาหารทั้งหมด

5.3 ข้อเสนอแนะ

1). ด้วยที่เครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนนั้นมีการทำงานแบบบรรจุต่อรอบ (batch-in-bin drying) ดังนั้นจะทำให้สูญเสียความต่อเนื่องในการบรรจุ หากมีการพัฒนาเป็นรูปแบบทำแบบต่อเนื่อง (continue drying) จะสามารถเพิ่มอัตราการผลิตสูงขึ้น และเพิ่มความต่อเนื่องอีกทั้งยังสามารถลดการสูญเสียความร้อนสะสมระหว่างที่การหยุดกระบวนการ

2). แหล่งพลังงานความร้อนจากแก๊สหุงต้มทำให้ยังไม่สามารถลดต้นทุนการอบแห้งได้เท่าที่คาดหวังไว้ หากมีการนำไปพัฒนาให้สามารถใช้ร่วมกับแหล่งความร้อนอื่นจะสามารถลดต้นทุนการผลิตมากขึ้น อาทิตเช่น ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานชีวะมวล เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กรมโรงงงานอุตสาหกรรม. (2551). **กระบวนการผลิตแป้งมันสาปะหลัง**. [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.thailandtapiocastarch.net

กล้าณรงค์ ศรีรอด (2542). **เทคโนโลยีของแป้ง**. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับริเคชัน จำกัด, กรุงเทพฯ.

ฐิติมา นรโภค และคณะ. (2561). **การใช้กากมันสำปะหลังหมักด้วยสารเสริมต่อปริมาณการกินได้และความสามารถย่อยได้ของโคเนื้อ**. แก่นเกษตร 46 ฉบับพิเศษ 1, 590-596.

กิตติพงษ์ กุลมาตย์ (2537). **การอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. คณะพลังงานและวัสดุ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ตันดี สุระ. (2553). **คุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง**. โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม ครั้งที่ 1. ขอนแก่น.

เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2553). **การคงคุณภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2556). **รายงานการวิจัยการศึกษาต้นแบบการลดความชื้นกากมันสำปะหลังโดยใช้ระบบอบแห้งแบบโรตารี่**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ทศพร จันทเมธิ. (2558). **การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรด**. บทสรุปโครงงานทางวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสุรนารี.

พิชาด เขจรศาสตร์. (ม.ป.ป.). กากมันสำปะหลังหมักยีสต์ อาหารสัตว์ต้นทุนต่ำ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร: หน่วยวิจัยวิทยาการขั้นสูงเพื่อการผลิตปศุสัตว์และสัตว์ปีก คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร.

นิติพงษ์ สมไชยวงค์. (ไม่ระบุบปี). เครื่องอบแห้งอินฟราเรดโดยใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงควบคุมแบบพีไอดี.

ปรีดา คาศรี, ยุวเรศ เรืองพานิช, เสกสม อาตมางกูร, อรประพันธ์ ส่งเสริม และ ณัฐชนก อมรเทวภัทร.(2552). ผลของระดับกากมันสาปะหลังและรูปแบบอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่เนื้อ. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 (หน้า 132-140). กรุงเทพฯ.

พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. (2555). การสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดกาแฟพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสาน. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาลัยราชภัฏลำปาง, 35.

พุททธินันทร์ จารวัฒน์. (2557). ศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งเนื้อมังคุดด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน. ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมจันทบุรี.

มหาวิทยาลัยศิลปากร (2561) รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ปี 2560. มหาวิทยาลัยศิลปากร : นครปฐม

วิเชียร ดวงสีเสน. (2556). การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. วารสารสมาคมวิศวกรรมการเกษตรแห่งประเทศไทย, 7-13.

วริยา โกสุม, ยุวเรศ เรืองพานิช, สุกัญญา รัตนทับทิมทอง และเสกสม อาตมางกูร. (2553). ผลของระดับกากมันสาปะหลังในสูตรอาหารสุกรอนุบาลต่อสมรรถภาพการผลิต. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 (หน้า 125-131). กรุงเทพฯ.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2552). การพัฒนากระบวนผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุสาหกรรมเอทานอล. ภาคีศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยสุรนารี.

เวียง อากรชี. (2560). วิจัยและพฒันาเครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับผลปาลม์น้ำมัน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมการเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่18, (หน้า 150). กรุงเทพมหานคร.

เวียง อากรชี. (ไม่ระบุบปี). การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบโรตารีสำหรับอบแห้งพืชเมล็ดหลายชนิด. การนำเสนอโครงงานวิจัย ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมจันทบุรี, 107-121.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2550). เนื้อที่เพาะปลูกมันสาปะหลังของประเทศไทย. [ออนไลน์].ได้จาก: http://www.oae.go.th/main.php

สุวรรณา พรหมทอง. (2548). การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางสรีรวิทยาจุลกายวิภาคและจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารไก่กระทงที่ได้รับอาหารสูตรมันสาปะหลังกับอาหารสูตรข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุทิศา เข็มผะกา. (2557). การใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับส่าเหล้าเป็นวัตถุดิบสำหรับสุกร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมาคมโรงผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. (ม.ป.ป.). สมาคมโรงผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. เข้าถึงได้จาก ราคากากมันสำปะหลังปี 2557 ถึง 2561: http://thaitapioca.org/2018

สมมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. (ม.ป.ป.). สมมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. เข้าถึงได้จาก ส่งออกกากมันสำปะหลังเดือนเมษา 2562: http://thaitapioca.org/2019

อติพงศ์ นันทพันธุ์. (2548). การทดสอบสมรรถนะของชุดสารดูดความชื้นแบบถาดสำหรับกระบวนการอบแห้งลำไย. วาสารวิชาการคณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 25-36.

อนุชา ชะลอกลาง. (2544). การใช้มันสาปะหลังทดแทนข้าวโพดในอาหารสุกรรุ่น-ขุน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุทัย คันโธ. (2526). อาหารและการคา นวณสูตรอาหารสัตว์. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมการเลี้ยงสุกรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

AOAC. (1990). Offcial Methods of Analysis. 17th ed. Assoc. Anal.Chem., Arlington, VA.

Brennan, J. J. (1990). Elsevier Science Publishing. In Food Engineering Operation (p. 700). New York.

Cole, D. J., Wiseman, A. J. and Varley, M. A. (1994). Principle of pig science. NottinghamUniversity Press, London.

Food- Info. (2014). Starch. [Online]. Available: http://www.food-info.net/uk/carbs/starch.htm

Khempaka, S., Molee, W., and Guillaume, M. (2009). Dried cassava pulp as an alternative feed stuff for broilers: effect on growth performance, carcass traits, digestive organs, and nutrient. J. Poult. Sci. Res. 18: 487-493.

Guillermo H. Crapiste and Enrique Rotstein. (1997). **Design and Performance Evaluation of Dryers**, P 125-166. In *Handbook of Food Engineering Practice*, ed. Kenneth J. Valentas, Enrique Rotstein and R. Paul Singh. CRC Press, Boca Raton.

Ryozo Toei, Morio Okazaki and Hajime Tamon. (1994). **Conventional Basic Design for Convection or Conduction Dryers**. Drying Technology 12(1&2): 59-97.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ก1 หาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง

ก1.1 ค่าความชื้น

หาค่าความชื้นตั้งต้นของตัวอย่างกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการคัดเลือกตัวอย่างที่ออกจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง (ขั้นตอนการแยกกาก) ไม่เกิน 30 นาที เนื่องด้วยหลังจากในช่วง 0-10 นาทีแรกตัวกากมันยังคงมีความร้อนสะสมเฉลี่ย 73.4 องศาเซลเซียส (วัดด้วยเครื่อง Infrared Thermometer Max: 380 องศาเซลเซียส ,error: ±1 เปอร์เซ็นต์) เก็บตัวอย่างไปหาค่าความชื้นด้วยเครื่อง TGM 800 สุ่มตัวอย่างใส่ในถ้วยขนาด 1.5 นิ้ว น้ำหนักต่อถ้วยไม่เกิน 1 กรัม (ก่อนเริ่มกระบวนการทุกครั้งต้องทำการนำถ้วยฟอยล์ ขนาด 1.5 นิ้ว เข้าเครื่องพร้อมทำการอุ่นเครื่องเพื่อไล่ความชื้นที่ตกค้างบนผิวของภาชนะออกเป็นเวลา 10 นาที) ทดสอบมาตรฐาน AOAC-Food ที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส จำนวนพร้อมกัน 8 ถ้วย ระยะเวลาการทำงาน 2 ชั่วโมงโดยประมาณ (ขึ้นอยู่กับความชื้นของตัวอย่างโดยที่ค่าความชื้นฐานเปียกต้องไม่เกิน 80 w.b.) หลักการทำของเครื่อง TGM 800 จะทำการปล่อยพลังงานความร้อนในรูปแบบของคลื่นอินฟราเรดตามอุณหภูมิที่กำหนดจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวล (มวลแห้ง) นำค่าที่ได้คำนวณตามสมการหาค่าความชื้น โดยทำการทดสอบทั้งหมด 2 รอบตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดก่อนหน้า

ความชื้นในวัสดุ (moisture content) เป็นดัชนีที่ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือมวลของวัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้สองรูปแบบ กล่าวคือ ความชื้นฐานแห้ง (dry basis moisture content) และความชื้นฐานเปียก (wet basis moisture content) โดยความชื้นทั้งสองรูปแบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก1) และ (ก2) ตามลำดับ

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100 \qquad (ก1)$$

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \qquad (ก2)$$

โดยที่ M_d คือ ความชื้นฐานแห้ง (d.b.)

M_w คือ ความชื้นฐานเปียก (w.b.)

W_{total} คือ น้ำหนักของวัสดุ (กิโลกรัม)

W_{dry} คือ มวลแห้งของวัสดุ (เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด) (กิโลกรัม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก2 การประเมินผลการทดลอง

ก2.1 ปริมาณน้ำที่ระเหยในกระบวนการอบแห้ง

คือจำนวนปริมาณที่ระเหยในกระบวนการอบแห้ง จนกระทั้งมีความฐานเปียกต่ำกว่า 13 w.b. โดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น (กิโลกรัม) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก3)

$$W_{water} = \frac{W_{dry} \times M_w}{100} \quad (ก3)$$

$$W_{water\ total} = W_{inside} + \sum_{i=0}^{n} W_{water\ through} \quad (ก4)$$

$$W_{loss} = W_{outside} - W_{water\ total} \quad (ก5)$$

โดยที่ W_{water} คือ น้ำหนักน้ำภายในวัสดุ (กิโลกรัม)

W_{dry} คือ มวลแห้งของวัสดุ (เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด) (กิโลกรัม)

M_w คือ ความชื้นฐานเปียก (w.b.)

$W_{water\ total}$ คือ น้ำหนักน้ำทั้งหมดภายในวัสดุ (กิโลกรัม)

W_{inside} คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุภายในถังอบ (กิโลกรัม)

$W_{water\ through}$ คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุภายใน ที่ลอดผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)

W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่ระเหยในกระบวนการอบแห้ง (กิโลกรัม)

$W_{outside}$ คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุภายในตะแกรง (กิโลกรัม)

ก2.2 สัดส่วนกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรงทรงกระบอก

มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรงทรงกระบอกต่อมวลแห้งของกากมันสำปะหลังทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก6)

$$PS_{inside} = \frac{W_{d,in}}{W_{d,total}} \times 100 \quad (ก6)$$

โดยที่ PS_{inside} คือ เปอร์เซ็นต์มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรง

$W_{d,in}$ คือ มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในตะแกรง (กิโลกรัม)

$W_{d,total}$ คือ มวลแห้งของกากมันสำปะหลังทั้งหมด (กิโลกรัม)

ก2.3 สัดส่วนกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านตะแกรงทรงกระบอก

มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านรูตะแกรงทรงกระบอกต่อมวลแห้งของกากมันสำปะหลังทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก7)

$$PS_{outside} = \frac{W_{d,out}}{W_{d,total}} \times 100 \qquad (ก7)$$

โดยที่ $PS_{outside}$ คือ เปอร์เซ็นต์มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านรูตะแกรง

$W_{d,out}$ คือ มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ลอดผ่านรูตะแกรง (กิโลกรัม)

$W_{d,total}$ คือ มวลแห้งของกากมันสำปะหลังทั้งหมด (กิโลกรัม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองและข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 หาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง

ตารางที่ ข1 ค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังสด

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบแห้ง (กรัม)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังอบแห้ง (กรัม)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.)
1	0.9613	0.2118	77.97
2	0.9378	0.2031	78.34
3	0.9412	0.2243	76.17
4	0.9373	0.9373	78.01
5	0.9144	0.9144	77.67
6	0.9131	0.9131	78.17
7	0.9950	0.995	78.64
8	0.9469	0.9469	77.05
เฉลี่ย			77.75

ตารางที่ ข2 ผลการทดลองหาความชื้นของกากมันสำปะหลังสดหลังผ่านการลดความชื้นทางกล

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบแห้ง (กรัม)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังอบแห้ง (กรัม)	ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.)
1	0.9293	0.2629	71.71
2	0.9586	0.3095	67.71
3	0.9866	0.3381	65.73
4	0.9292	0.3102	66.62
5	0.9216	0.2585	71.95
6	0.9516	0.2581	72.88
7	0.9144	0.3191	65.10
8	0.9714	0.2908	70.06
เฉลี่ย			68.97

ข.2 ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์อัตราการอบแห้ง

ตารางที่ ข3 ข้อมูลการทดสอบการไล่ความชื้นด้วยวิธีการตากลานปูน (ทดสอบในเดือน มกราคม และกุมภาพันธ์) อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส ณ สถานที่การทำการทดลอง ทดสอบที่น้ำหนักกากมันสำปะหลังสด 15 กิโลกรัม ตารางที่ ข4 ข้อมูลอัตราการอบแห้งด้วยวิธีการตากปูน

ตารางที่ ข3 ข้อมูลการทดสอบการไล่ความชื้นด้วยวิธีการตากลานปูน

ตัวอย่างที่	**ค่าความชื้น (w.b.)**									
เวลา (นาที)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	79.02	78.33	77.45	78.63	79.29	77.93	79.52	78.39	79.92	78.21
30	77.12	75.46	76.75	74.99	74.27	72.73	76.74	76.31	76.79	77.82
60	75.83	68.91	74.11	70.02	70.77	66.10	70.74	70.18	72.69	64.94
90	71.90	68.49	66.82	67.41	69.99	58.28	63.85	69.99	65.92	62.16
120	65.42	65.65	64.35	66.19	69.31	52.98	58.11	64.92	59.90	55.76
150	64.91	59.71	59.22	64.52	62.35	51.04	55.16	60.75	53.47	49.02
180	62.58	52.88	57.22	62.20	59.26	44.77	51.51	53.71	49.47	43.99
210	58.84	47.67	51.81	55.97	54.22	41.21	45.07	49.49	46.88	43.02
240	53.29	43.25	49.40	54.37	50.74	35.40	40.90	46.35	44.68	41.01
270	47.12	37.20	45.06	49.80	46.70	31.84	39.99	42.53	39.26	40.03
300	43.22	32.25	40.76	48.03	40.87	30.58	37.31	36.30	29.63	34.26
330	40.97	25.50	33.82	42.16	36.15	28.76	34.64	30.35	25.35	31.37
360	33.81	18.78	32.82	37.63	28.39	26.62	28.94	30.13	19.95	26.91
390	27.45	17.95	31.28	31.98	22.42	19.54	23.22	28.04	15.17	24.92
420	22.44	10.64	26.44	24.50	16.42	13.82	16.57	21.53	13.52	21.62
450	20.59		21.50	20.59	8.97	7.71	14.28	19.01	8.43	17.85
480	15.96		15.81	16.51			10.49	18.04		15.24
510	8.65		12.03	13.80				10.76		9.86
540				11.05						

ตารางที่ ข4 ข้อมูลการทดสอบการไล่ความชื้นด้วยวิธีการตากลานปูน

อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง)										
ตัวอย่างที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR	1.57	1.73	1.58	1.43	1.77	1.80	1.63	1.62	1.79	1.64
เฉลี่ย	1.66									

ตารางที่ ข5 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน (ต้นแบบ) (ทดสอบในเดือน มกราคม และกุมภาพันธ์) อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 35 องศาเซลเซียส ณ

สถานที่การทำการทดลอง ทดสอบที่น้ำหนักกากมันสำปะหลังสด 15 กิโลกรัม(ไม่ผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์)

ตารางที่ ข5-1 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

ค่าความชื้น (w.b.)	80 องศาเซลเซียส								
	10 RPM			15 RPM			20 RPM		
ความเร็วลม(m/s) / เวลา(นาที)	8	9	10	8	9	10	8	9	10
0	77.75	77.85	78.51	78.22	78.04	78.04	78.62	78.81	78.70
30	75.51	75.80	75.33	76.88	75.56	75.56	75.51	76.10	75.39
60	68.19	70.66	67.84	67.72	66.90	66.90	65.30	65.24	67.10
90	59.01	59.44	60.15	57.75	55.16	55.16	56.51	54.59	56.05
120	48.47	49.82	49.69	47.63	46.65	46.65	45.48	43.73	45.15
150	42.62	44.74	45.13	43.07	42.48	42.48	40.17	38.16	40.77
180	26.58	28.71	27.11	27.35	29.18	29.18	26.94	27.96	27.65
210	18.61	16.89	18.19	18.37	17.04	17.04	18.04	18.53	18.49
240	13.06	12.19	12.19	13.00	12.42	12.42	12.88	11.93	12.42

*ค่าที่ได้เป็นข้อมูลจากการเฉลี่ย

ตารางที่ ข5-2 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

ค่าความชื้น (w.b.)	90 องศาเซลเซียส								
	10 RPM			15 RPM			20 RPM		
ความเร็วลม(m/s) / เวลา(นาที)	8	9	10	8	9	10	8	9	10
0	79.46	79.08	79.05	79.11	79.02	78.89	79.11	78.85	79.17
30	77.31	76.31	76.03	73.59	74.18	71.21	73.04	70.02	69.78
60	68.10	64.23	61.00	63.45	62.37	60.94	62.16	60.70	59.50
90	57.28	53.19	54.23	54.70	52.49	51.64	52.06	50.43	40.12
120	49.47	46.64	47.43	43.59	42.14	41.52	41.50	40.86	39.82
150	42.11	41.46	39.87	39.85	38.68	37.79	36.40	35.15	34.07
180	28.46	26.39	26.24	24.13	22.41	21.73	22.35	22.37	22.27
210	17.91	16.05	17.05	16.78	15.96	15.51	16.58	17.07	15.42
240	11.97	11.57	11.11	10.54	10.81	10.27	9.89	9.82	10.19

*ค่าที่ได้เป็นข้อมูลจากการเฉลี่ย

ตารางที่ ข5-3 ข้อมูลการทดสอบอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

ค่าความชื้น (w.b.)	100 องศาเซลเซียส								
	10 RPM			15 RPM			20 RPM		
ความเร็วลม(m/s) / เวลา(นาที)	8	9	10	8	9	10	8	9	10
0	78.88	78.83	79.03	78.77	78.57	79.34	79.33	78.96	79.27
30	75.74	75.00	75.80	75.56	74.94	76.48	74.83	76.14	74.87
60	64.93	62.74	61.19	61.57	64.92	63.94	62.12	60.29	58.89
90	46.65	52.39	53.68	51.98	54.20	52.78	43.77	43.26	43.25
120	40.30	45.53	46.80	33.65	35.97	32.86	31.96	32.31	34.12
150	30.87	32.47	32.10	21.95	23.39	23.75	21.85	21.65	25.08
180	20.02	14.82	15.86	16.59	16.80	17.09	16.22	15.98	15.98
210	12.88	12.06	12.94	12.54	11.48	11.70	11.44	10.86	10.95

*ค่าที่ได้เป็นข้อมูลจากการเฉลี่ย

ตารางที่ ข5-4 ข้อมูลอัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัม ต่อ ชั่วโมง) ความเร็วลมหมุนเวียน (เมตร ต่อ วินาที)		
		8	9	10
80	10	3.12	3.16	3.17
	15	3.13	3.16	3.15
	20	3.14	3.18	3.16
90	10	3.19	3.20	3.22
	15	3.25	3.24	3.26
	20	3.28	3.28	3.27
100	10	3.59	3.63	3.58
	15	3.60	3.61	3.65
	20	3.67	3.70	3.69

*ค่าที่ได้เป็นข้อมูลจากการเฉลี่ย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ค1 หาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างการทดลอง

ค่าความชื้น

คำนวณหาค่าความชื้นจากตัวอย่างการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ หลักเกณฑ์ในการคัดเลือก และจำแนกตัวอย่างการทดลอง

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบแห้ง (กรัม)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังอบแห้ง (กรัม)
1	0.9613	0.2118

$$M_d = \frac{W_{total} - W_{dry}}{W_{total}} \times 100\%$$

$$M_d = \frac{0.9613\ g - 0.2118\ g}{0.9613\ g} \times 100\%$$

$$M_d = 77.9673 \approx 77.97\ \%$$

ค2 หาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate ;DR)

คำนวณหาค่าความชื้นที่ออกจากวัสดุในช่วงระยะเวลานึง เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามที่ตั้งวัตถุประสงค์ไว้ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม$_{น้ำ}$ ต่อชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วลมหมุนเวียน (เมตร ต่อ วินาที)
80	10	8

$$DR = \frac{W_{total} - W_{water}}{t}$$

$$DR = \frac{15\ kg - 2.52\ kg}{4\ hr}$$

$$DR = 3.12\ \frac{kg_{water}}{hr}$$

ค3 หาอัตราการการร่วงผ่านตะแกรง

คำนวณหามวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงต่อมวลแห้งของกากมันสำปะหลัง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วลมหมุนเวียน (เมตร ต่อ วินาที)
80	10	8

$$GPS = \frac{GW}{AW} \times 100\%$$

$$GPS = \frac{7.35\ kg}{15\ kg} \times 100\%$$

$$GPS = 61.25\ \%$$

ค3 หาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการคือ 13 w.b. ต่อปริมาณน้ำ โดยการหาปริมาณน้ำที่ถูกระเหยไปจนเหลือความชื้นต่ำกว่า 13 w.b.

ค3.1 หาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจากพลังงานความร้อน

ค่าพลังงานความร้อนจากแก๊สหุงต้มและพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ตลอดเวลาในการอบแห้ง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วลมหมุนเวียน (เมตร ต่อ วินาที)
80	10	8

$$SEC_{LPG} = \left(\frac{HHV \times M}{W_{loss}}\right)$$

$$SEC_{LPG} = \left(\frac{50{,}140\ kJ/kg \times 1.28\ kg}{12.48\ kg}\right)$$

$$SEC_{LPG} = 5142.56\ kJ/kg_{waters} \approx 5.1426\ MJ/kg_{waters}$$

$$SEC_{Energy} = \frac{3.6P_e}{W_{loss}}$$

$$SEC_{Energy} = \frac{3.6 \times 0.895\ kW}{12.48\ kg}$$

$$SEC_{Energy} = 0.2567\ MJ/kg_{waters}$$

$$\sum_{i=0}^{n} SEC = SEC_{LPG} + SEC_{Energy}$$

$$\sum_{i=0}^{n} SEC = 5.1426 + 0.2567$$

$$\sum_{i=0}^{n} SEC = 5.3993\ MJ/kg_{waters}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างศึกษา

เมธี เฉียดสระน้อย และ ธีทัต ดลวิชัย (2564).ทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35 (ME-NETT2021)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม
ETM-0006

ทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน
Test of Cassava Pulp Dryer for House hold Farmers

เมธี เฉียดสระน้อย[1] และ ธีทัต ดลวิชัย[2]

[1]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000
*ติดต่อ: prapun@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน โดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนจากแก๊สหุงต้ม (LPG) วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) ลดความชื้นทางกลด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (2) ทดสอบการตากแห้งด้วยวิธีธรรมชาติ (3) ทดสอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบกากมันสำปะหลังโดยศึกษาอุณหภูมิลมร้อนที่ 80, 90, 100 องศาเซลเซียส โดยรูตะแกรงมีขนาด 2 มิลิเมตร ความเร็วลมอยู่ที่ 8, 9, 10 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 10, 15, 20 รอบต่อนาที ควบคุมด้วยแดมเปอร์ (Volume Damper) นำลมร้อนบางส่วนมาใช้ใหม่เพื่อลดการสูญเสียลมร้อนในห้องอบกากมันสำปะหลัง ปริมาณกากมันสำปะหลังในการทดลองครั้งละ 15 กิโลกรัม โดยใช้กากมันสำปะหลังที่มีความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis) ตั้งต้นอยู่ที่ 78% ประเมินสมรรถนะการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเวลาในการอบแห้งความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการทดสอบพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังคือ อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาทีและความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 20 รอบต่อวินาที เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 69.08 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำและระยะเวลาต่ำสุดคือ 2.993 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ และ 2.5 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยกากมันสำปะหลังมีความชื้นเฉลี่ย 12.47%w.b. และมีสัดส่วนมวลแห้งค้าง 63.91%

คำหลัก: กากมันสำปะหลัง, การลดความชื้น, เครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

Abstract

This research aims to study the Cassava Pulp Dryer for household Farmers with LPG. The Research Methodology has three phases, namely: Phase 1. Mechanical dehumidifier with extruder machine. Phase 2. Dehumidifying with natural and phase 3. Dehumidifying with cassava pulp dryer machine. The data were analyzed by the control variable includes hot air. The temperature was 80, 90, 100 C° with 2 mm. of the screen, Air velocity was 8, 9, 10 m/s, and RPM of motors was 10, 15, 20 rev/ min control with volume damper. Using cassava pulp which has humidity in 78%w.b. Drying characteristics, drying rate, drying time, final moisture content and specific energy consumption (SEC) were determined to evaluate drying. The result of the most suitable drying is drying air temperature of 100 C° and air velocity was 10 m/s since it gave the highest drying rate of 69.08 kg water h^{-1}, the specific energy consumption and drying time of 2.993 MJ(kg water)$^{-1}$ and 2.5 h, respectively. The final moisture content and dry solid of residue cassava pulp in the sieve were 12.47%w.b. and 63.91%w.b., respectively.

Keywords: Cassava Pulp, Dehumidifier, Cassava Pulp Dryer for Small Family Farmers

1 บทนำ

กากมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังทั้งระดับอุตสาหกรรมและ ระดับชุมชนจากรายงานในภาคการส่งออกของกากมันสำปะหลังจากสมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังประเทศไทย เดือนเมษายน 2562 มีปริมาณ 45,624 ตัน เปรียบเทียบกับเดือนเมษายน 2561 ซึ่งมีปริมาณ 6,600 ตัน ปริมาณการส่งออกเพิ่มขึ้น 39,024 ตัน หรือ 85% ในภาคการส่งออก และราคากากมันสำปะหลังในช่วงปี 2557 ถึง2561 มีแนวโน้มสูงขึ้น นั้นแปลว่า

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม
ETM-0006

มีความต้องการภายในและต่างประเทศที่สูงขึ้นดังข้อมูลในตารางที่ 1และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การส่งออกกากมันสำปะหลังเดือนเมษายนของประเทศไทยปี 2562 และปี 2561

ประเทศ	เมษายน 2561		เมษายน 2562	
	ปริมาณ(ตัน)	มูลค่า(บาท)	ปริมาณ(ตัน)	มูลค่า(บาท)
นิวซีแลนด์	-	-	25,348.755	107,515,654
คูเวต	-	-	10,500.000	42,874,108
เกาหลีใต้	6,600.000	24,101,679	9,575.000	40,311,122
จีน	-	-	200.000	942,546
รวม	6,600.00	24,101,679	45623.755	191,643,430

ตารางที่ 2 ราคากากมันสำปะหลังปี 2557 ถึง 2561

เดือน	ปี 2557	ปี 2558	ปี 2559	ปี 2560	ปี 2561
มกราคม	3.80-3.95	2.15-2.25	1.65-1.80	2.35-2.50	3.00-3.15
กุมภาพันธ์	3.50-3.85	2.15-2.20	1.65-1.80	2.40-2.50	3.15-3.25
มีนาคม	3.40-3.65	2.10-2.15	1.65-1.80	2.40-2.60	3.20-3.35
เมษายน	2.90-3.00	1.80-2.15	1.65-1.80	2.40-2.60	3.35-3.40
พฤษภาคม	3.00	1.80-2.00	1.75-2.20	2.40-2.60	3.35-3.45
มิถุนายน	2.80-3.00	1.80-2.00	2.00-2.30	2.40-2.60	3.35-3.50
กรกฎาคม	3.00	1.80-2.00	2.10-2.40	2.45-2.70	3.35-4.00
สิงหาคม	3.00	1.90-2.20	2.20-2.50	2.45-2.70	3.50-4.00
กันยายน	3.00-3.10	1.90-2.20	2.20-2.50	2.45-2.80	3.60-4.00
ตุลาคม	2.50-3.10	1.80-2.00	2.00-2.40	2.60-2.80	3.60-4.00
พฤศจิกายน	2.15-2.80	1.80-2.00	2.00-2.30	2.75-2.90	3.30-4.00
ธันวาคม	2.15-2.30	1.70-2.00	2.00-2.40	2.80-3.10	

*ราคาต่ำสุด-สูงสุด หน่วย:บาท/กิโลกรัม

ทำให้ปัจจุบันเกษตรกรต้องหาวิธีแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ทดแทน เช่น การใช้กากมันสำปะหลังในอาหารสัตว์น้ำ โดยใช้ผสมกับอาหารปลานิลมีอัตราส่วนในการผสม ปลาป่น 1/4 ส่วน รำละเอียด 1/4 ส่วน และกากมันสำปะหลัง 2/4 ส่วน หรืออาหารโคขุน (ที่น้ำหนักโคขุน 150 กิโลกรัม) ใบหรือหัวมัน 1/2 ส่วน และกากมันสำปะหลัง 1/2 ส่วน แต่เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีความชื้นสูงทำให้เน่าบูดได้ง่าย จึงทำให้กระบวนการแรกสุดในการเก็บรักษา ก่อนที่จะนำไปทำอาหารสัตว์ทดแทนคือ การไล่ความชื้นให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นมาตรฐานเปียก 13% แต่เนื่องด้วยเครื่องจักรที่มีต้นทุนที่สูง ทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่เลือกที่จะขายกากมันสำปะหลังที่ออกมาจากกระบวนการผลิตแป้งมันมีความชื้นมาตฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 78% วีรชัย และคณะ (2552) เพื่อลดภาระต้นทุนการแปลรูปจึงทำให้ขาดรายได้ในส่วนนี้ไป ทำให้คณะผู้วิจัยทำการออกแบบและ สร้างต้นแบบเครื่องอบกากมันสำปะหลังมาทดสอบการทำงานและ ทดสอบการลดความชื้นด้วยการตากปูน เช่นเดียวกับการลดความชื้นในข้าวเปลือก เพื่อเพิ่มโอกาสสร้างรายได้แก่เกษตรกรรายย่อย

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 กากมันสำปะหลัง

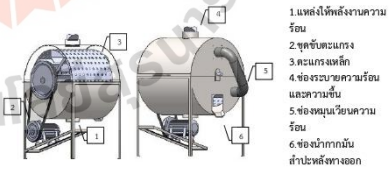
กากมันสำปะหลังสดที่ใช้ในการทดลองได้จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (บริษัทอุสาหกรรมแป้งโครราช จำกัด, จังหวัดนครราชสีมา) มีความชื้นมาตฐานเปียกเฉลี่ยอยู่ที่ 78% วีรชัย และคณะ (2552) ความหนาแน่นเฉลี่ย 712.50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีลักษณะปรากฏดังแสดงใน (รูปที่ 1)

รูปที่ 1 กากมันสำปะหลังสด

2.2 เครื่องอบแห้ง

เครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนต้นแบบ (รูปที่ 2) เป็นเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน (รูปที่ 3) มีความจุของถังอบแห้ง 0.04 ลูกบาศก์เมตร รูตะแกรงขนาด 2 มิลิเมตร โดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน

รูปที่ 2 ต้นแบบเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

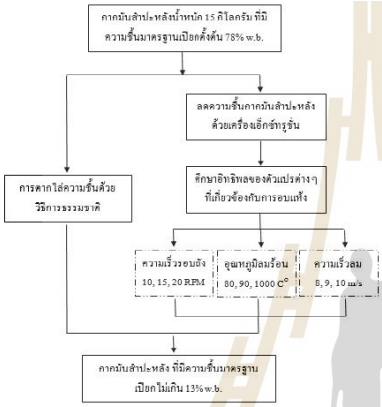


รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม
ETM-0006

2.3 ทดสอบและเก็บข้อมูล

การดำเนินการทดลองประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ การตากไล่ความชื้นด้วยวิธีการทางธรรมชาติ เตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่นและ การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งโดยมีขั้นตอน ดังแสดงใน (รูปที่ 4) และมีขั้นตอนการทดลองดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 แผนขั้นตอนการทดลอง

ตารางที่ 3 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
- ความชื้นกากมันสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องอบ	- สุ่มเก็บตัวอย่างทุกครั้งที่เริ่มทำการทดลองด้วยสภาวะอื่น ๆ หาความชื้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด	- ความชื้นเริ่มต้น - น้ำหนักน้ำเริ่มต้น - น้ำหนัก มวลแห้งเริ่มต้น
- น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง	- เก็บตัวอย่างที่ร่วงผ่านรูตะแกรงชั่งน้ำหนักโดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นในถังอบเหลือน้อยกว่า 13 % w.b.	- สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด - น้ำหนัก สะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง(มวลแห้ง)
- ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง	- เก็บตัวอย่างที่ร่วงผ่านรูตะแกรงชั่งน้ำหนักโดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นในถังอบเหลือน้อยกว่า 13 % w.b.	- ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลัง ที่ผ่านรูตะแกรง - น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น - น้ำหนักมวลแห้งที่เวลาต่าง ๆ
- ความชื้นกากมันสำปะหลังภายในถังอบแห้ง	- หยุดหมุนถังอบสุ่มตัวอย่างนำไปหาความชื้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นเหลือน้อยกว่า 13 % w.b.	- สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในถังอบ - ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง - อัตราส่วนความชื้นกากมันสำปะหลัง - น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น
- น้ำหนักของแก๊สที่ใช้การอบแห้ง	- ชั่งน้ำหนักแก๊สก่อนทำการทดลองและระหว่างทำการทดลองให้ชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที พร้อมกับ การเก็บตัวอย่างต่าง ๆ น้ำหนักที่ใช้คือน้ำหนักก่อนลบด้วยน้ำหนักหลังใช้	- ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน
- พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง	- จดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไประหว่างทำการทดลองโดยใช้ค่าพลังงานก่อนใช้ลบด้วยค่าพลังงานหลังใช้โดยอ่านค่าทุก 30 นาทีพร้อมกับการเก็บข้อมูล	- ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

2.4 การประเมินสมรรถนะในการอบแห้ง

ข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ, อัตราส่วนความชื้น, ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, สัดส่วนการลอดผ่านรูตะแกรง, สัดส่วนการคงค้างภายในถังอบแห้ง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม
ETM-0006

2.4.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการคือ 13% w.b. ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย โดยการหาปริมาณน้ำที่ถูกระเหยไปกระทั่งเหลือความชื้นต่ำกว่า 13% w.b. พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังมี 2 ส่วนดังนี้

1. ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนเป็นความสิ้นเปลืองที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการทดลองนี้ใช้แก๊สหุงต้มหรือแก๊สชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง (HHV_{LPG}= 50,140 kJ/kg, U.S. Department of energy, 2556) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1), วิเชียร ดวงสีเสน (2555)

$$Energy=\left(\frac{HHV\times M}{t\times 3600}\right)/W_{loss} \quad (1)$$

โดยที่ Energy คือ พลังงานที่เข้าไปในระบบ (kW)
HHV คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
M คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)
t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)
W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จากพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากมอเตอร์ต้นกำลังต่างๆ สมการที่ (2)

$$SEC=\frac{3.6P_e}{W_{loss}} \quad (2)$$

โดยที่ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water})
W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)
t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)
P_e คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (kW·h)

2.4.2. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis moisture content) สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$M_w=\frac{w-d}{w} \quad (3)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.)
W คือ มวลของวัสดุ (kg)
d คือ มวลแห้งของวัสดุ(เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด) (kg)

2.4.3. อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

เป็นความสามารถในการกำจัดความชื้นออกจากวัสดุโดยดูจากอัตราการระเหยของน้ำต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการ (4), สุทธิศักดิ์ (2254)

$$DR=\frac{m_d(M_{pi}-M_{pf})}{t} \quad (4)$$

โดยที่ DR คือ อัตราการอบแห้ง ($kg_{water}\ h^{-1}$)
m_d คือ มวลของกากมัน (kg)
M_{pi} คือ ความชื้นก่อนอบแห้ง (%wb)
M_{pf} คือ ความชื้นหลังอบแห้ง (%wb)
t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.4.4. เปอร์เซ็นต์การร่วงผ่านตะแกรง

มวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงต่อมวลแห้งของกากมันสำปะหลังเริ่มต้น สามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$GPS=\frac{GW}{AW}\times 100\% \quad (5)$$

โดยที่ GPS คือ เปอร์เซ็นต์การร่วงผ่านตะแกรง (%)
GW คือ มวลกากมันสำปะหลังแห้งที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (kg)
AW คือ มวลกากมันสำปะหลังแห้งเริ่มต้น (kg)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้ง

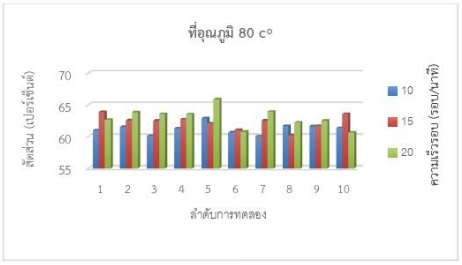
กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งแบ่งได้ 2 ส่วน คือกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง และกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง โดยลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงเป็นเส้นใยละเอียด (รูปที่ 5) ที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรง (2 มิลลิเมตร) กากมันสำปะหลังเหล่านี้จะร่วงมาช่วงต้น และสัมผัสกับตัวถังอบและลมร้อนจากช่องหมุนเวียนความร้อนโดยตรง ทำให้มีความชื้นต่ำกว่ากากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง (รูปที่ 6) จะเป็นกากมันสำปะหลังที่มีลักษณะเป็นก้อนจึงไม่ร่วงผ่านรูตะแกรงจึงได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องด้วยมีขนาดที่ใหญ่ทำให้มีอัตราการสูญเสียความชื้นที่น้อยกว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม
ETM-0006

รูปที่ 5 กากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง

รูปที่ 6 กากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง

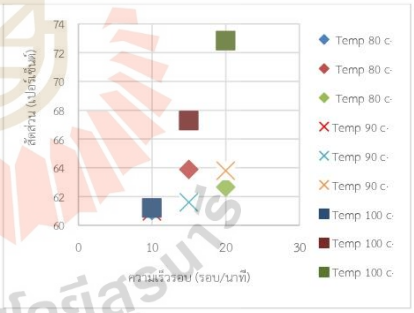
อัตราส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความเร็วรอบของการหมุนของตะแกรง เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของมวลกากมันสำปะหลังที่เป็นกองในตะแกรงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นตะกอนเล็กๆร่วงผ่านรูตะแกรง (รูปที่ 7) ส่วนความเร็วลมของช่องหมุนเวียนความร้อนส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง

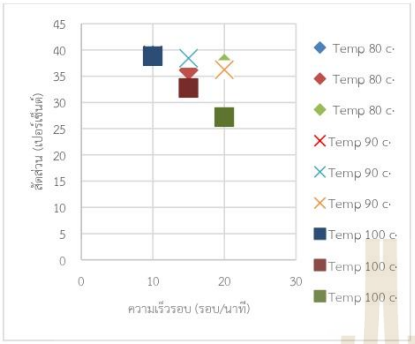
3.2. สมรรถนะของเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

เมื่อทำการทดสอบอบแห้งกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นมาตรฐานเปียกตั้งต้นอยู่ที่ 78%wb วีรชัย และคณะ (2552) ด้วยเครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนโดยใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน จะได้กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งแบ่งได้ 2 ส่วน คือกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง และกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง เมื่อพิจารณาตามรูปแบบการทดลองที่ตั้งไว้พบว่า มีสัดส่วนแตกต่างกันน้อยมาก (รูปที่ 8 และรูปที่ 9) เนื่องจากปริมาณของกากมันสำปะหลังในการทดสอบนั้นคงที่ที่ 15 กิโลกรัม



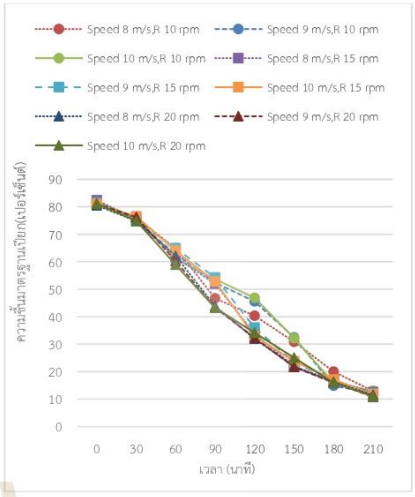
รูปที่ 8 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

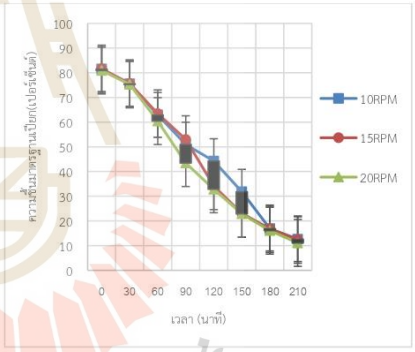


รูปที่ 9 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง

เมื่อพิจารณาความชื้นกับอุณหภูมิทุกๆ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 80 กับ 90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบของตะแกรงและความเร็วลมของช่องหมุนเวียนความร้อน พบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้งให้มีความชื้นมาตรฐานเปียกเฉลี่ยต่ำกว่า 13% ธนธัช มุขขันธ์ และคณะ (2552) 3 ชั่วโมง แต่เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส พบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 2.5 ชั่วโมงในการทำให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นมาตรฐานเปียกเฉลี่ย 13.85% (รูปที่ 10) โดยไม่ส่งผลเรื่องสีของกากมันสำปะหลัง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกับความเร็วลม 8, 9 และ10 เมตรต่อวินาที พบว่ามีความแตกต่างเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาความเร็วรอบของตะแกรงหมุน 10,15 และ20 รอบต่อนาที พบว่ามีอัตราส่วนการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ (รูปที่ 11) เมื่อพิจารณาพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำที่อุณหภูมิลมร้อนที่ 80, 90, 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลมอยู่ที่ 8, 9, 10 เมตรต่อวินาที และความเร็วรอบถังคลีบตะแกรง 10, 15, 20 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามลำดับ (รูปที่ 12)



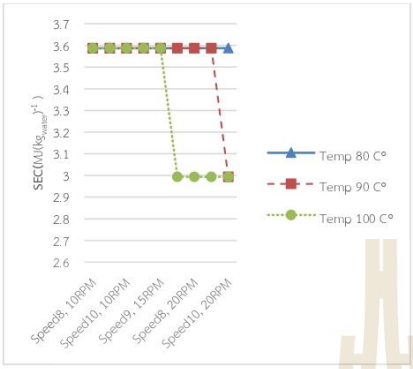
รูปที่ 10 สมรรถนะการอบแห้งที่อุณภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 ความเร็วรอบที่มีผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง

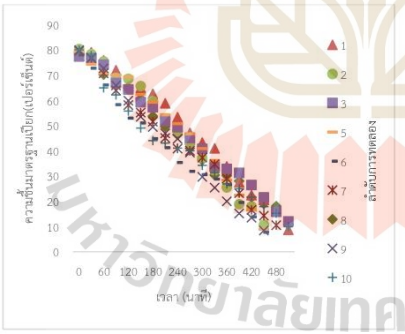
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35
วันที่ 20 -23 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 จังหวัดนครปฐม
ETM-0006



รูปที่ 12 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในทุกสภาวะ

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการอบแห้งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังคือ อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาทีและความเร็วรอบถังครีบตะแกรง 20 รอบต่อวินาที เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 69.08 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อทำการเปรียบกับการลดความชื้นด้วยการตากปูนความหนา 5 มิลิเมตร (ทดสอบในเดือน มกราคม และกุมภาพันธ์) มีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 19.66 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และใช้เวลาเฉลี่ย 7.5 ชั่วโมง (รูปที่ 13)



รูปที่ 13 ลดความชื้นด้วยการตากปูน

3.3. การประยุกต์ใช้เครื่องอบกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

จากการทดสอบจะพบว่าในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในช่วงต้นกระบวนการจะสมรรถนะในการลดความชื้นที่น้อย ซึ่งกากมันสำปะหลังจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ กากมันสำปะหลังที่อยู่ในตะแกรง และกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลิเมตร สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ทดแทน อาทิเช่น การใช้กากมันสำปะหลังในอาหารสัตว์น้ำโดยใช้ให้อาหารปลานิลมีอัตราส่วนในการผสม ปลาป่น 1/4 ส่วน รำละเอียด 1/4 ส่วน และกากมันสำปะหลัง 2/4 ส่วน บัลดล โชติการ (2552) หรืออาหารโคขุน (ที่น้ำหนักโคขุน 150 กิโลกรัม) ในส่วนของใบหรือหัวมันสำปะหลัง 1/2 ส่วนและกากมันสำปะหลัง 1/2 ส่วน สุขทวี นามวงษ์ (2559)

ส่วนของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรงที่มีขนาดมากกว่า 2 มิลิเมตร นำมาบดเพื่อเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ทดแทน หรือนำไปเป็นเชื้อเพลิงเป็นต้น

4 สรุป

จากการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้ การทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือนในด้านสมรรถนะ ทดสอบอบแห้งน้ำหนักกากมันสำปะหลัง 15 กิโลกรัม โดยมีเงื่อนไขในการอบแห้งที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 100 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาทีและความเร็วรอบถังคลีบตะแกรง 20 รอบต่อวินาที มีอัตราการอบแห้งสูงสุดคือ 69.08 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ระยะเวลาต่ำสุด และ 2.5 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยกากมันสำปะหลังมีความชื้นสุดท้ายกเฉลี่ย 12.47%wb โดยใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำคือ 2.993 เมกกะจูลต่อชั่วโมง โดยไม่ส่งผลเรื่องสีของกากมันสำปะหลัง ซึ่งสิ้นเปลืองมากกว่าสภาวะอื่นเล็กน้อย

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้สนับสนุนการวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

[1] ฐิติมา นรโภค และคณะ. การใช้กากมันสำปะหลังหมักด้วยสารเสริมต่อปริมาณการกินได้และความสามารถย่อยได้ของโคเนื้อ. แก่นเกษตร 46 ฉบับพิเศษ 1, 2561,หน้า 590-596.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[2] เทวรัตน์ ทิพยวิมล. การคงคุณภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553,หน้า 3-8.
[3] พิชาด เขจรศาสตร์. กากมันสำปะหลังหมักยีสต์ อาหารสัตว์ต้นทุนต่ำ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร: หน่วยวิจัยวิทยาการขั้นสูงเพื่อการผลิตปศุสัตว์และสัตว์ปีก คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร, ม.ป.ป.
[4] ตันดี สุระ. คุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง. โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม ครั้งที่ 1. ขอนแก่น, 2553.
[5] ทศพร จันทเมธิ. การออกแบบและสร้างระบบอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้รังสีอินฟราเรด. บทสรุปโครงงานทางวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสุรนารี, 2558.
[6] สุทิศา เข็มผะกา. การใช้กากมันสำปะหลังร่วมกับส่าเหล้าเป็นวัตถุดิบสำหรับสุกร. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557,หน้า 21-22.
[7] เทวรัตน์ ตรีอำนรรค. รายงานการวิจัยการศึกษาต้นแบบการลดความชื้นกากมันสำปะหลังโดยใช้ระบบอบแห้งแบบโรตารี่. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556,หน้า 3-13.
[8] วิเชียร ดวงสีเสน. "การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน." วารสารสมาคมวิศวกรรมการเกษตรแห่งประเทศไทย, 2556,หน้า 7-13.
[9] วีรชัย อาจหาญ และคณะ. "การพัฒนากระบวนผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุสาหกรรมเอทานอล." ภาคีศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยสุรนารี, 2552
[10] เว็บไซต์สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. สมมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. ม.ป.ป. ,[ระบบออลไลน์],แหล่งที่ม http://thaitapioca.org, เข้าดูเมื่อวันที่15/02/2563.
[11] U.S. Department of energy. 2556. Lower and Higher Heating Values of Fuels. [ระบบออลไลน์], แหล่งที่มา http://hydrogen.pnl.gov เข้าดูเมื่อวันที่ 4/03/2563

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ME NETT 2021

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35 (ME-NETT 2021)

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

เมธี เฉียดสระน้อย และ ธีทัต ดลวิชัย

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความในหัวข้อ

ทดสอบเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังสำหรับภาคครัวเรือน

20-22 กรกฎาคม 2564 ณ มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม (ในรูปแบบออนไลน์)

(ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
นายกสมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุดากร)
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ETM0006

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นาย เมธี เฉียดสระน้อย เกิดวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2538 เป็นบุตรของ นาย อำพล เฉียดสระน้อย และนางสาว ทองใบ ใกล้การค้า เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนสุขานารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นชั้นปีที่ 1-3 ณ โรงเรียนบุญวัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายชั้นปีที่ 4-6 ณ โรงเรียนเชียงใหม่แอ๊ดเวนตีส อคาเดมี อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศกรรมการผลิตยานยนต์ ณ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

ในปี พ.ศ. 2561 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ผลงานวิจัยระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอเข้าร่วมการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 35 (ME-NETT2021) วันที่ 20-22 กรกฎาคม 2564

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี