การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

นายวิเชียร ดวงสีเสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

A STUDY OF DRYING CASSAVA PULP

USING A ROTARY SCREEN DRYER

Wichian Duangsrisen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Agriculturaland Food Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน)
ประธานกรรมการ

____

(อ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)
กรรมการ

____

(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)
กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิเชียร ดวงสีเสน : การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน (A STUDY OF DRYING CASSAVA PULP USING A ROTARY SCREEN DRYER) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน (Rotary Screen Dryer) การทดสอบครั้งนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 3 mm และมีความจุ 0.5 m^3 การดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง คือ ความชื้น และ ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง (2) การลดความชื้นทางกลโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (3) การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิในการอบแห้ง (100 และ 120°C) ความเร็วรอบในการหมุน (2 4 และ 6 rpm) และ ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ (20 40 และ 60 kg)

ผลการทดสอบพบว่า กากมันสำปะหลังสดที่ออกจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะชื้นมากและจับตัวกันเป็นก้อนโดยมีความชื้นเฉลี่ยคือ 372.53% d.b. และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 712.50 kg/m^3 เมื่อผ่านการลดความชื้นทางกล พบว่ากากมันสำปะหลังมีความชื้นลดลงเหลือ 216.11% d.b. และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 571.45 kg/m^3 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ ความเร็วรอบ 6 rpm อุณหภูมิ 100 ºC และ น้ำหนักป้อนกากมันสำปะหลัง 40 kg (14% ของปริมาตรถัง) จะใช้เวลาในการอบแห้งคือ 1.5 ชั่วโมง อัตราการอบแห้ง 7.84 $kg_{dry\ solid}/hr$ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำคือ 5.94 MJ/kg_{water} กากมันสำปะหลังที่ได้มีสองส่วนคือ ส่วนที่ร่วงผ่านรูตะแกรงของถังอบ 56.20 % ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 107.21% d.b. และส่วนที่ค้างภายในตะแกรงของถังอบทรงกระบอก 43.80 % ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 14.55% d.b.

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร ลายมือชื่อนักศึกษา__________

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา__________

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม__________

WICHIAN DUANGSRISEN : A STUDY OF DRYING CASSAVA PULP USING A ROTARY SCREEN DRYER. THESIS ADVISOR : TAWARAT TREEAMNUK, D.Eng., 96 PP.

ROTARY SCREEN DRYER/ CASSAVA PULP/ DRYING

This research aims to study cassava pulp drying using a rotary screen dryer. The rotary screen dryer used had a screen size of 3 mm with a total capacity of 0.5 m^3. The research procedures consisted of three steps: (1) study of physical properties of cassava pulp, i.e. moisture content and bulk density; (2) mechanically dewatering of cassava pulp using an extruder; and (3) test of cassava pulp drying with the rotary screen dryer. The factors investigated are rotary dryer speed (2, 4 and 6 rpm), air temperature (100 and 120°C) and quantity of cassava pulp in the rotary (20, 40 and 60 kg)

The results showed that cassava pulp initially produced from the cassava starch manufacturing plant was very wet and holding together with an average moisture content of 372.53% d.b. and a bulk density of 712.50 kg/m^3. The moisture content was decreased to 216.11% d.b. after mechanically dewatering with a corresponding bulk density of 571.45 kg/m^3. The best conditions for cassava pulp drying were found with hot air temperature of 100 °C, rotary speed of 6 rpm and pulp quantity of 40 kg (14% of the total rotary volume). At these conditions, the drying time was 1.5 hours with a drying rate of 7.84 $kg_{dry\ solid}$/hr and a specific energy consumption of 5.62 MJ/kg_{water}. The dried cassava pulp consisted of two portions: one passing through the screen with an average moisture content of 107.21% d.b.,

accounting for 56.20% of the total dried pulp; and the other (43.80%) remained in the rotary, having an average moisture content of 14.55% d.b.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature________________

Advisor's Signature________________

Co- Advisor's Signature____________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยอาทิเช่น

อาจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการช่วยแก้ไขปัญหาตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน และ อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบกลั่นกลองวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ภารกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่อนุเคราะห์เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

บุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่คอยให้กำลังกายช่วยสนับสนุนการทำวิจัย

คุณกรรณิการ์ ประเสริฐสังข์ และ คุณอลิษา ศรีคราม ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาในอดีตจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

วิเชียร ดวงสีเสน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฐ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 บทนำ 5
2.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 5
2.2.1 กากมันสำปะหลัง 6
2.3 การรีดน้ำด้วยหลักการเอ็กซ์ทรูชั่น 8
2.3.1 ประเภทของเครื่องอัดผ่านเกลียว 9
2.4 การอบแห้ง 10
2.4.1 หลักการอบแห้ง 11
2.4.2 จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics) 12
2.4.3 ความชื้นวัสดุ 15
2.4.4 การหาปริมาณความชื้น 16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 ชนิดของเครื่องอบแห้ง 16

2.5.1 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ 17

2.5.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาค 20

2.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 20

2.6.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน 20

2.6.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากมอเตอร์ต้นกำลังต่างๆ 21

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

3 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย 23

3.1 การศึกษาคุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง 24

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ 24

3.1.2 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง 26

3.2 เตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่น 28

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ 29

3.2.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 29

3.2.3 วิธีการเตรียมกากมันสำปะหลัง 31

3.3 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน 32

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ 32

3.3.2 รายระเอียดเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน 35

3.3.3 วิธีการทดลอง 36

4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 41

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง 41

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง 41

4.2 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน 43

4.2.1 การศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งและ ความเร็วรอบในการหมุนที่เหมาะสมในการอบแห้ง 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 การศึกษาปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังตะแกรงทรงกระบอกที่เหมาะสมในการอบแห้ง 51
4.3 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบ 60
4.3.1 สมดุลพลังงานของระบบ 60
4.3.2 สมดุลมวลของระบบ 61
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 62
5.1 คุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง 62
5.2 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน 62
5.2.1 การศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งและ ความเร็วรอบในการหมุนที่เหมาะสมในการอบแห้ง 62
5.2.2 การศึกษาปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังตะแกรงทรงกระบอกที่เหมาะสมในการอบแห้ง 62
5.3 ข้อเสนอแนะ 63
รายการอ้างอิง 64
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ 66
ภาคผนวก ข. ตารางผลการทดลองและข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ 72
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณ 81
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 87
ประวัติผู้เขียน 96

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง 3
2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกกากมันสำปะหลัง 7
2.2 อัตราส่วนหลังการคัดขนาดและจำนวนกระจุกเส้นใย 8
2.3 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง 18
3.1 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง 37
4.1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นเปียกของกากมันสำปะหลังสด 41
4.2 ผลการทดลองหาค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังผ่านการลดความชื้นทางกล 42
4.3 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังสด 42
4.4 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังผ่านการลดความชื้นทางกล 42
4.5 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบต่างๆ (อุณหภูมิลมร้อน 100 °C) 45
4.6 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบต่างๆ (อุณหภูมิลมร้อน 120 °C) 46
4.7 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่น้ำหนักป้อนต่างๆ (อุณหภูมิลมร้อน 100 °C) 51
4.8 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่น้ำหนักป้อนต่างๆ (อุณหภูมิลมร้อน 120 °C) 52
4.9 สมดุลพลังงานของระบบความร้อน 60
4.10 สมดุลพลังงานภายในถังอบแห้ง 60
4.11 สมดุลมวลของระบบความร้อน 61
4.12 สมดุลมวลภายในถังอบแห้ง 61
ข.1 ความหนาแน่นกากมันสำปะหลังผ่านสกรูรีดน้ำ 73
ข.2 ความหนาแน่นกากมันสำปะหลังสด 73
ข.3 การทดลองระหว่าง ความเร็วรอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง 73
ข.4 การทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง 74
ข.5 การทดลองระหว่าง ความเร็วรอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง 76
ข.6 การทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง 77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข.7 ผลการทดสอบลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ 79
ข.8 ผลการทดสอบลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ขนาดรูหัวดายต่างๆ 79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 สมดุลมวล ของผลิตภัณฑ์ และ By-product จากผลผลิตหัวมันสดปริมาณ 20 ล้านตัน........6
2.2 จำนวนเส้นใยที่มีความยาวต่างๆของกากมันสำปะหลังแต่ละส่วนเทียบกับเยื่อใยสั้น..........8
2.3 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder)..9
2.4 Schematic of the food drying phenomenon...11
2.5 การลดลงของความชื้นวัสดุ...12
2.6 การอบแห้งวัสดุจากสิ่งมีชีวิตในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและคงที่.............................15
2.7 เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว...18
2.8 เปอร์เซนต์การสูญเสียความร้อนที่ทางออกเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านถังทรงกระบอก.........19
3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย...23
3.2 กากมันสำปะหลังสดจาก 25
3.3 กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอัดรีด..25
3.4 ตู้อบแห้งแบบลมร้อน 26
3.5 โถดูดความชื้น...26
3.6 เครื่องชั่งสองตำแหน่ง...26
3.7 ภาชนะทรงกระบอก 26
3.8 Calorimeter..26
3.9 ตัวอย่างกากมันก่อนอบและหลังอบ...27
3.10 การทดสอบหาความหนาแน่นปรากฏ...28
3.11 กากมันสำปะหลังที่อบแห้งโดยไม่ผ่านกระบวนการลดความชื้นทางกล (Extrusion)........29
3.12 ภาพประกอบเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 29
3.13 แบบร่างประกอบเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 30
3.14 ลักษณะปรากฏของกากมันสำปะหลังหลังผ่านการอัดรีด 31
3.15 กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอัดรีด...33
3.16 เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน..33
3.17 แหล่งความร้อน 34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.18 Thermocouple Type K....34
3.19 เครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด....34
3.20 เครื่องชั่ง....34
3.21 มิเตอร์ไฟฟ้า....34
3.22 Multi-Parameter Ventilation Meter....34
3.23 รายระเอียดเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน....35
3.24 แผนผังการเก็บข้อมูล....36
3.25 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบ....40
3.26 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบความร้อน....40
3.27 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลภายในถังอบแห้ง....41
4.1 กากมันสำปะหลังสด....45
4.2 กากมันสำปะหลังอัดรีดจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์....45
4.3 กากมันสำปะหลังส่วนที่ผ่านตะแกรง....46
4.4 กากมันสำปะหลังส่วนที่ยังคงค้างภายในถัง....46
4.5 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด....49
4.6 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด....49
4.7 น้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (มวลแห้ง)....50
4.8 ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ....50
4.9 ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง....51
4.10 อัตราการอบแห้งกากมันสำปะหลัง....52
4.11 พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ....52
4.12 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด....55
4.13 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด....56
4.14 น้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (มวลแห้ง)....56
4.15 ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ....57
4.16 ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง....57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.17 อัตราการอบแห้งกากมันสำปะหลัง....58

4.18 พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ....59

ข1 ลักษณะกากมันสำปะหลังอัดรีดที่ได้จากหัวดายแต่ละขนาด....77

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

h_g	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
k_g	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
T	=	อุณหภูมิ
P_v	=	water vapor partial pressure
M_{wb}	=	ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก
M_{db}	=	ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง
W_w	=	มวลของความชื้น
W_d	=	มวลแห้งของวัสดุ
w.b	=	Wet basis (มาตรฐานเปียก)
d.b.	=	Dry basis (มาตรฐานแห้ง)
SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg-water)
T_{Energy}	=	พลังงานรวมที่เข้าไปในระบบ (kW)
T	=	เวลาในการอบแห้ง (hr)
W_{loss}	=	น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)
ρ_b	=	ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)
m	=	มวลของกากมันสำปะหลังในภาชนะ (kg)
V	=	ปริมาตรของภาชนะ (m^3)
Energy	=	พลังงานที่เข้าไปในระบบ (kW)
HHV_{LPG}	=	ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
M_{LPG}	=	น้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg)
t	=	เวลาในการอบแห้ง (hr)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (% d.b./hr)
M_{pi}	=	ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (% d.b.)
M_{pf}	=	ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (% d.b.)
HHV	=	ค่าปริมาณความร้อน
W_1	=	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

W_2	=	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)
$W_{w,t}$	=	น้ำหนักรวมของน้ำในวัสดุ (kg)
W_{in}	=	น้ำหนักน้ำในวัสดุภายในถังอบ (kg)
$W_{w,i}$	=	น้ำหนักน้ำในวัสดุที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ (kg)
W_{loss}	=	น้ำหนักน้ำที่ระเหยทั้งหมดในการอบแห้ง (kg)
$W_{w,1}$	=	น้ำหนักน้ำในวัสดุก่อนเข้าเครื่องอบ (kg)
$\%_r$	=	สัดส่วนคงค้างภายในถังอบตะแกรงทรงกระบอก (%)
W_a	=	น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการอบแห้ง ($kg_{dry\ solid}$)
$W_{r,i}$	=	น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ค้างภายในถังอบช่วงเวลาต่างๆ ($kg_{dry\ solid}$)
$\%_f$	=	สัดส่วนการร่อนผ่านตะแกรง (%)
$W_{f,i}$	=	น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงช่วงเวลาต่างๆ ($kg_{dry\ solid}$)
$W_{f,a}$	=	มวลแห้งสะสมที่ร่วงผ่านตะแกรง ($kg_{dry\ solid}$)
$\%_{AVG}$	=	ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (% d.b.)
$W_{w,i}$	=	ผลรวมของน้ำภายในกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรง (kg)
$W_{d,i}$	=	ผลรวมมวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรง ($kg_{dry\ solid}$)
Q_{in}	=	ความร้อนที่เข้าระบบ (kW)
Q_{loss}	=	ความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (kW)
Q_{out}	=	ความร้อนที่ออกจากระบบ (kW)
$\dot{m}_a$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (kJ/kg ºC)
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg ºC)
W_1	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศใหม่
T_1	=	อุณหภูมิเริ่มต้น (ºC)
T_2	=	อุณหภูมิหลังผ่านห้องผสมอากาศ (ºC)
W_{mix}	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผสม
W_{in}	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องผสมอากาศ
W_{RC}	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศเวียนกลับ
RC_a	=	อัตราการเวียนอากาศกลับ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Q_{in}	=	ความร้อนที่เข้าระบบ (kW)
Q_F	=	ความร้อนที่ออกจากระบบอบแห้ง (kW)
Q_{System}	=	ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงภายในวัสดุอบแห้ง (kW)
$\dot{m}_{mix}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศก่อนอบแห้ง (kg/s)
C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (kJ/kg ºC)
C_v	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg ºC)
h_{fg}	=	ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ (kJ/kg)
W_{out}	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)
T_4	=	อุณหภูมิหลังการอบแห้ง (ºC)
T_3	=	อุณหภูมิก่อนเข่าระบบอบแห้ง (ºC)
RC_Q	=	อัตราการเวียนความร้อนกลับ
W_{in}	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)
W_{out}	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)
M_{in}	=	ความชื้นของกากมันสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องอบ (% db)
M_{out}	=	ความชื้นของกากมันสำปะหลังหลังออกจากเครื่องอบ (% db)
m_{CP}	=	มวลกากมันสำปะหลังแห้ง ($kg_{dry\ solid}$)
$\dot{m}_{in}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งก่อนอบแห้ง (kg_{dryair}/s)
Δt	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากสถิติของสำนักเศรษฐกิจเกษตร ในปี 2551 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังสูงสุดเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากไนจีเรีย และบราซิลตามลำดับ และมีผลผลิตรวมกว่า 20 ล้านตัน และจังหวัดนครราชสีมาเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังสูงสุดคือ 1,804,213 ไร่ โดยมีผลผลิตมันสำปะหลังเท่ากับ 5,050,774 ตัน (สำนักเศรษฐกิจเกษตร, 2551)ผลผลิตหัวมันทั้งหมดในประเทศไทย 100% จะนำไปผลิตเป็น มันเส้น/มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 50:50 ของจำนวนผลผลิตทั้งหมด อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปทางเกษตรกรรมหลักของประเทศไทย ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังที่จดทะเบียนกับสมาคมการค้าอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังไทยอยู่ 51โรงงาน (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550) ตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมาถึง 21 โรงงาน

กระบวนการผลิตมันเส้น และมันอัดเม็ดพบว่าจะไม่มีผลพลอยได้ (By-Product) เกิดขึ้นแต่ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะเกิดผลพลอยได้ขึ้น คือ เปลือกมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังโดย ผลผลิตหัวมันสด 20 ล้านตัน ก่อให้เกิดเปลือกมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลังเท่ากับ 0.3 ล้านตัน และ1.5 ล้านตัน ตามลำดับ (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550) ในกระบวนการสกัดแป้งมันสำปะหลังก่อให้เกิดวัสดุเหลือใช้ในปริมาณมากในรูปกากมันสำปะหลัง (หัวมันสำปะหลังสด 1 ตันจะให้ปริมาณกากมันสำปะหลังประมาณ 60กิโลกรัม) กากมันสำปะหลังที่ออกมาจากกระบวนการผลิต มีความชื้นสูง หรือ ประมาณ 60-72%w.b. (ตารางที่ 1.1) จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก และเป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ โดยหากปล่อยทิ้งไว้จะเกิดสภาพการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนชุมชนที่อยู่รอบข้างอย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีของกากมันสำปะหลัง ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่ามีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้มาก เนื่องจากกากมันสำปะหลังมี องค์ประกอบของแป้งสูงปริมาณแป้งที่เหลืออยู่ในกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักแห้ง มีสูงถึงร้อยละ 68 จึงนิยมนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์หรือนำไปใช้แหล่งคาร์บอนให้จุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบ Solid-state ใช้กันมากในการผลิตสารประกอบต่างๆ ที่ใช้กันในอุตสาหกรรม เช่น แอลกอฮอล์กรดอินทรีย์สารให้กลิ่นรส และสารปรุงแต่ง ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอางค์และยา เป็นต้น (Pandey et al., 2000)

สำหรับประเทศไทย กากมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะนำไปใช้ผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ดและอาหารสัตว์ โดยโรงงานแป้งจะขายกากมันได้ราคาถูกมากประมาณ 0.50 บาทต่อกิโลกรัมกากสด การใช้ประโยชน์กากมันเป็นสิ่งที่สำคัญมากเนื่องจากยังคงมีแป้งตกค้างในกากมันค่อนข้างสูง ดังที่แสดงในข้างต้น กากมันที่ตกค้างเป็นจำนวนมากคือเกิดการสูญเสียแป้ง และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะในโรงงานได้ในกรณีที่ระบายกากมันสำปะหลังออกจากโรงงานไม่ทัน

ปัญหาที่สำคัญของการใช้ประโยชน์กากมันสำปะหลังคือ การขาดแคลนเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแปรรูปกากมันสำปะหลังแห้งเพื่อเป็นวัตถุดิบเบื้องต้นสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ขั้นต่อไป เพื่อประโยชน์สูงสุดต่อการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มอื่นๆ เช่น กรดอินทรีย์, เอทานอล, อาหารสัตว์ เป็นต้น

การเลือกโนโลยีที่เหมาะสมในการแปรรูปกากมันสำปะหลังแห้งจะต้องพิจารณาประสิทธิภาพในการลดความชื้น เป็นสำคัญ อย่างไรก็ดี กากมันสำปะหลังมีความชื้นสูงมากกระบวนการรีดน้ำ (Dewatering) จึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและลดค่าดำเนินการในกระบวนการอบแห้งได้โดยตรง กระบวนการรีดน้ำโดยวิธีทางกล (mechanical dewatering) อาทิหลักการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifuge) และหลักการเอกซ์ทรูชั่น (Extrusion) ทั้งนี้วิธีการเอ็กซ์ทรูชั่นมีข้อดีหลายประการ เช่น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำอัตราการผลิตสูงและสามารถลดค่าWater Activityได้ เป็นต้นโดยลักษณะการทำงานคือ การเค้นหรือนวดวัสดุด้วยเกลียวอัด (Screw Conveyer)

สำหรับกระบวนการอบแห้งมีงานวิจัยของ (สุระ ตันดี, 2553) ได้ศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องทำการทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของ ความชื้นที่เวลาต่างกันจากการทดสอบพบว่าความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาการอบแห้ง อุณหภูมิ และความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น จุดที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในการทดลองนี้ คือความเร็วลมร้อน 8 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ทำให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นลดลงเหลือ 7.69%w.b. ใช้เวลาในการอบแห้ง 2 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเนื่องจากปกติแล้วกากมันสำปะหลังมีความชื้นเริ่มต้น และมีความหนาแน่นสูง (72 %w.b., 685 kg/m^3) และมีลักษณะจับตัวเป็นก้อน การอบแห้งโดยการใช้เครื่องอบแบบต่อเนื่องโดยการอาศัยการพาความร้อนผ่านวัสดุต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นาน

เครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryers) การหมุนของตัวถังทรงกระบอกของเครื่องอบแห้งจะอาศัยใบพาช่วยโรยวัสดุอบผ่านอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ และเพิ่มอัตราการลดความชื้น (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) ผลการศึกษาของ (กิตติพงษ์ กุลมาตย์, 2537) ที่ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุนพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยคิดในรูปพลังงานปฐมภูมิต่อปริมาณน้ำที่ระเหยมีค่าประมาณ 8-25 MJ/kg$_{water}$ เมื่อความชื้นข้าวเปลือกลดลงอัตราการ

สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ(วีรชัย และคณะ,2552) ได้ศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ พบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำการระเหยน้ำออกจากชิ้นมันได้ในอัตรา 140.18 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ 10.07 MJ/kg-water สามารถลดความชื้นของมันเส้นให้มีค่าต่ำกว่า 13%w.b. จากความชื้นเริ่มต้น 60%w.b.

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการเตรียมกากมันสำปะหลังแห้งเพื่อเป็นวัตถุดิบเบื้องต้นสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ขั้นต่อไปโดยใช้กระบวนการรีดน้ำ(Dewatering) ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) ในการลดปริมาณน้ำในกากมันสำปะหลังเบื้องต้น และศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryers) ซึ่งเป็นเครื่องอบแห้งที่เหมาะจะนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังซึ่งมีความชื้นสูงได้ทั้งนี้จะพัฒนากระบอกหมุนจากถังทรงกระบอกทึบเป็นทรงกระบอกแบบตะแกรงเพื่อประสิทธิภาพในการอบแห้งเนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของกากมันสำปะหลังมีลักษณะจับตัวเป็นก้อน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ จะทำให้ทราบข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ เพื่อสามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่หมุนเพื่อใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันต่อไป

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

ส่วนประกอบ	% (น้ำหนักเปียก)	% (น้ำหนักแห้ง)
แป้ง	17.80±1.24	68.89±4.00
ความชื้น	72.00±0.08	-
เถ้า	0.44±0.00	1.70±0.01
โปรตีน	0.40±0.00	1.55±0.03
เยื่อใย	7.17±0.06	27.75±0.20
ไขมัน	0.03±0.00	0.12±0.01
pH	4.99	4.99

ที่มา : (Sriroth et al., 2000); (ทรงศักดิ์ วัฒนชัยเสรีกุล, 2543); (วีรชัย และคณะ, 2552)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบโรตารี่หมุน อันประกอบด้วยปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ ความเร็วรอบถังอบ และอุณหภูมิ

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะของการอบแห้งแบบโรตารี่หมุน คือ อัตราการอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้เป็นกากมันสำปะหลังที่เหลือจากกระบวนการผลิตแป้งภายใน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยนำมากำจัดน้ำด้วยวิธีทางกลเบื้องต้น

1.3.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm ยาว 120 cm ขนาดรูตะแกรง 3 mm ขนาดความจุ 0.5 m^3 ใช้ GAS BURNER เป็นแหล่งความร้อน โดยมี LPG เป็นเชื้อเพลิง

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบโรตารี่หมุน ในลักษณะที่วัสดุอบแห้งสามารถเคลื่อนที่ลอดผ่านรูตะแกรงลงสู่ด้านล่าง อันประกอบด้วย ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ ความเร็วรอบถังอบ และอุณหภูมิ

1.3.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะของการอบแห้งแบบโรตารี่หมุนในลักษณะที่วัสดุอบแห้งสามารถเคลื่อนที่ลอดผ่านรูตะแกรงลง คือ อัตราการอบแห้ง เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รูปแบบการอบแห้งรูปแบบใหม่จากการประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งที่มี

1.4.2 เป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นกากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมัน

1.4.3 สามารถช่วยลดเวลาในการดำเนินการอบแห้งทำให้ผู้ผลิตไม่เกิดความเหนื่อยล้าจากการดำเนินการทำแห้งกากมันแบบตากลาน

1.4.4 ลดปัญหาเรื่องกลิ่นอันเนื่องมาจากการทำแห้งกากมันไม่ทัน รวมทั้งการซึมปนเปื้อนของน้ำเสียจากลานตากกากมันสำปะหลังสู่พื้นดินบริเวณใกล้เคียง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังคุณสมบัติของกากมันสำปะหลังการรีดน้ำด้วยเอ็กท์ทรูชั่นโดยกล่าวถึงหลักการและประเภทของเครื่องอัด การอบแห้งโดยกล่าวถึงหลักการอบแห้งและชนิดของเครื่องอบแห้ง พลังงานจำเพาะ สมดุลมวล และ สมดุลพลังงาน

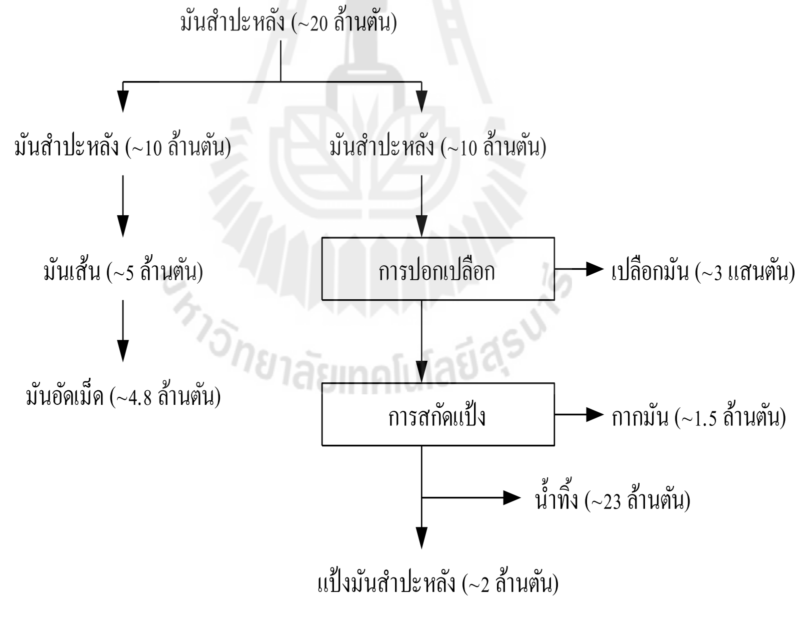
2.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสลัดแห้งเป็นกระบวนการผลิตแบบใหม่และเป็นกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่โรงงานโดยทั่วไปใช้กันอยู่ในปัจจุบันในกระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยการเตรียมวัตถุดิบโดยหัวมันสำปะหลังจะถูกลำเลียงผ่านระบบสายพานไปสู่เครื่องร่อนดินทราย (sand removal dram) เพื่อแยกดินทรายและเศษเปลือกหรือรากไม้ที่ปนออกมาจากหัวมันสำปะหลังจากนั้นหัวมันจะถูกล้างโดยผ่านเครื่องล้างหัวมันและถูกลำเลียงด้วยสายพานเพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องสับหัวมัน หัวมันที่มีขนาดเล็กลงจะผ่านท่อลงสู่เครื่องโม่มีลักษณะเป็นลูกกลิ้งที่มีใบมีดขนาดเล็กจำนวนมากในระหว่างโม่มีการเติมน้ำเพื่อให้การโม่ทำได้สะดวกขึ้นโดยมากน้ำที่ใช้เป็นน้ำหมุนเวียนเพื่อประหยัดน้ำและลดการสูญเสียแป้งไปกับน้ำทิ้งของเหลวข้นจากเครื่องโม่จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องดีแคนเตอร์เพื่อแยกน้ำทิ้งที่มีโปรตีนและไขมันออกจากเนื้อแป้ง โดยอาศัยหลักของแรงหนีศูนย์กลาง ส่วนแป้ง เส้นใย และกากจะถูกเหวี่ยงแยกออกเป็นน้ำแป้งความเข้มข้นสูง ซึ่งบางโรงงานอาจไม่ใช้เครื่องนี้ดังนั้นน้ำแป้งที่ได้จากเครื่องโม่จะเข้าหน่วยสกัดแป้งเลย น้ำแป้งจากเครื่องดีแคนเตอร์ (หรือเครื่องโม่สำหรับโรงงานที่ไม่ใช้เครื่องดีแคนเตอร์) จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องสกัดแป้งเพื่อแยกน้ำแป้งออกจากกากและเส้นใยโดยน้ำแป้งจะผ่านเข้าสู่ชุดสกัดหยาบก่อนเพื่อแยกเอากากมันสำปะหลังหยาบออกจากน้ำแป้งแล้วจึงเข้าสู่ชุดสกัดละเอียดโดยอาศัยแรงเหวี่ยงในการสกัดทำให้กากและเส้นใยติดอยู่บนแผ่นกรองจากนั้นจะถูกใบมีดของเครื่องปาดกวาดเข้าสู่เครื่องอัดกากมันเพื่อรีดน้ำออกเพื่อเป็นอาหารสัตว์ต่อไป (กล้าณรงค์ ศรีรอต,2542)

สำหรับน้ำแป้งที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยและกากผ่านแผ่นกรองไปรวมกันด้านล่างและถูกทำให้บริสุทธิ์ขึ้นโดยผ่านผ้ากรองที่มีขนาดเล็กลงของเครื่องสกัดละเอียดที่มีเป็นชุดๆ จากนั้นน้ำแป้งจะถูกทำให้บริสุทธิ์ และเข้มข้นขึ้นโดยเครื่องแยกแป้ง สารคอลลอยด์จะถูกแยกออกจากน้ำแป้ง ใน

ขณะเดียวกันจะใช้น้ำสะอาดป้อนเข้าไปแทนสิ่งเจือปนในน้ำแป้งสิ่งเจือปนในน้ำแป้งจะถูกแยกเหวี่ยงและไหลขึ้นด้านบนของเครื่อง น้ำแป้งที่เข้มข้นกว่าจะไหลออกด้านล่าง ในโรงงานมักใช้เครื่องแยกแป้ง 2 ชุด เพื่อให้ได้น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูง ส่วนน้ำทิ้งที่ได้จากเครื่องนี้จะถูกหมุนเวียนนำไปใช้ประโยชน์ใหม่ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน น้ำแป้งจะถูกลดความชื้นด้วยเครื่องสลัดแห้งซึ่งเป็นเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป้งเข้มข้น ได้เป็นแป้งหมาดที่มีความชื้นประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นแป้งหมาดจะถูกเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180-200ºC ในหน่วยอบแป้งแล้วตกลงมาเข้าสู่ไซโคลนร้อนทำให้แป้งมีความชื้นลดลงตามต้องการแล้วถูกดูดเข้าสู่เครื่องไซโคลนเย็นอีกชุดหนึ่ง แล้วผ่านเข้า เครื่องร่อนแป้งได้เป็นแป้งละเอียดเพื่อนำไปบรรจุถุงต่อไป (กล้าณรงค์ ศรีรอต, 2542)

จากข้อมูลของ (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550) แสดงถึงสมดุลมวลของผลิตภัณฑ์และ By-product จากผลผลิตหัวมันสดปริมาณ 20ล้านตัน ในปี 2550 ที่ก่อให้เกิดกากมันสำปะหลังเท่ากับ1.5ล้านตัน ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สมดุลมวล ของผลิตภัณฑ์ และ By-product จากผลผลิตหัวมันสดปริมาณ 20 ล้านตัน ในปี 2550 (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2550)

2.2.1 กากมันสำปะหลัง

ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตแป้งนั้น จะก่อให้เกิดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำเสีย และกากของเสีย (กากมันสำปะหลัง เศษเหง้า เปลือกและดิน

ทราย) ในส่วนของกากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง เช่น กากมันสำปะหลัง โดยหัวมันสดหนึ่งตันจะให้ปริมาณกากมัน 60 กิโลกรัม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) ในปัจจุบันกากมันสำปะหลัง จะถูกนำไปทำปุ๋ย ปลูกเห็ดและทำเป็นอาหารสัตว์ นำไปสกัดแป้งเพื่อการผลิตเอทานอลเป็นต้น ในปัจจุบันมูลค่าทางการค้าของกากมันสำปะหลังยังคงมีมูลค่าสูงอยู่ ซึ่งจากสถิติการนำเข้า-ส่งออกของสำนักงานเศรษฐกิจทางการเกษตรพบว่าในช่วงปี 2550-2555มีแนวโน้มมูลค่าการส่งออกที่เพิ่ม(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552) ดังแสดงในตารางที่2.1โดยปี 2550 มีมูลค่าการส่งออกประมาณ 1,379 ล้านบาท และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปียกเว้นปี 2552และในปี 2555 พบว่ามีมูลค่าสูงถึงประมาณ 2,500 ล้านบาท ซึ่งยังไม่รวมข้อมูลการส่งในเดือนธันวาคม ซึ่งถือได้ว่าเป็นสินค้าที่สร้างรายได้เข้าประเทศที่สูงและน่าสนใจอีกชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกกากมันสำปะหลัง

ปี (พ.ศ.)	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
2550	407,327,195	1,379,040,874.00
2551	331,775,883	1,562,585,940.00
2552	434,953,394	1,059,531,847.00
2553	537,272,055	1,614,298,142.00
2554	421,532,426	1,969,455,887.00
2555*	552,482,433	2,465,588,921.00

หมายเหตุ * ไม่รวมข้อมูลเดือนธันวาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

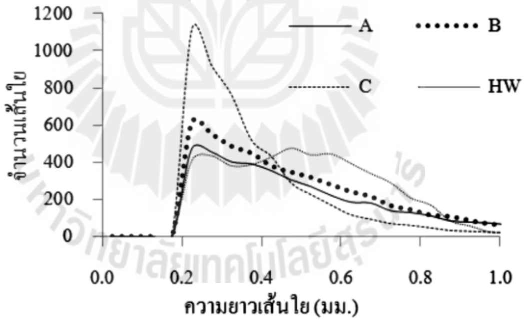
กากมันสำปะหลังมีส่วนประกอบ (น้ำหนักแห้ง) ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส โปรตีน ไขมัน และ เถ้า ในอัตราส่วน 50%, 10.98%, 1.57%, 0.15% และ 2.09% ตามลำดับ (กล้าณรงค์ ศรีรอต, 2540) กากมันที่ออกมาจากโรงงานจะมีความหนาแน่นเปียกเฉลี่ยเท่ากับ 712.5kg/m^3 และมีความชื้นสูงประมาณ 77.49%w.b.(วีรชัย และคณะ, 2552) ซึ่งเป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ยากเนื่องจากมีข้อเสียก็คือ มีกลิ่นเหม็นซึ่งรบกวนกับชุมชนที่อยู่รอบข้าง ในปัจจุบันได้มีการใช้เอนไซม์สองชนิด คือ *pectinase* และ *cellulose* ในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแป้งทำให้ได้กากมันที่มีปริมาณแป้งน้อยลง ซึ่งหากนำกากมันนี้มาทำให้แห้งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือนำไปใช้ในเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้ ปัจจุบันการลดความชื้นกากมันยังใช้วิธีการตากบนพื้นคอนกรีตขนาดใหญ่ในช่วง 8 เดือนที่ไม่มีฝนตก แต่ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ซึ่งส่วนใหญ่ฝนจะตกหนักก็จะทำให้ตากไม่ได้ ทำให้เกิดปัญหาในการจัดการ

ดังนั้นการพัฒนาเครื่องอบแห้งเพื่อนำมาลดความชื้นกากมันสำปะหลังจะก่อให้เกิดศักยภาพในการนำกากมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ต่อไปอย่างมาก

(นันทพร ตรีภพนาถ, 2554) ได้คัดขนาดกากมันโดยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 25 และ 50 เมช พบว่าขนาดระหว่าง 25-50 เมช (B) มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ขนาดเล็กกว่า 50 เมช (C) และ ขนาดใหญ่กว่า 25 เมช (A) ตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2 พบว่ากากมันที่ขนาดใหญ่จะมีจำนวนกระจุกเส้นใยอยู่มาก จากรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงผลของความยาวเส้นใยกากมันสำปะหลังขนาดต่างๆ และเยื่อใยสั้นพบว่ากาก A และ B มีขนาดเส้นใยที่ใกล้เคียงกันแต่กาก A มีปริมาณน้อยมาก

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนหลังการคัดขนาดและจำนวนกระจุกเส้นใย

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

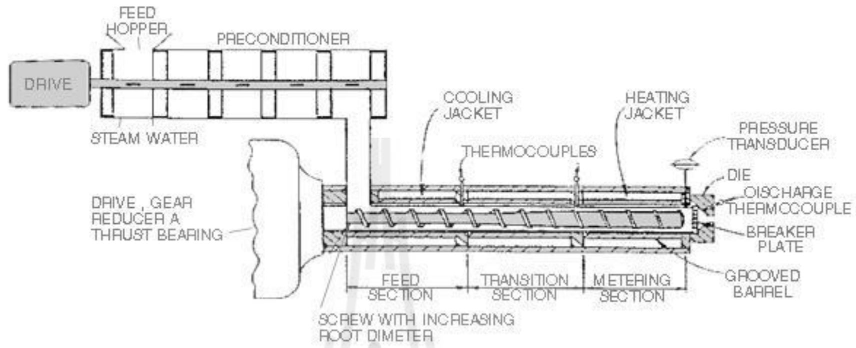


รูปที่ 2.2 จำนวนเส้นใยที่มีความยาวต่างๆของกากมันสำปะหลังแต่ละส่วนเทียบกับเยื่อใยสั้น

2.3 การรีดน้ำด้วยหลักการเอ็กซ์ทรูชั่น

เอ็กซ์ทรูชั่น หรือการดันผ่านเกลียวเป็นกระบวนการที่ผสมผสานกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลายเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การต้ม การนวด และขึ้นรูป โดยหลักการของเครื่องเอกซ์ทรูชั่นคือการเค้นหรือนวดวัสดุด้วยเกลียวอัด (Screw Conveyer) ออกมาผ่านหน้าแปลน (Die) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นแท่งหรือเป็นเม็ด ซึ่งอาจมีการให้ความร้อนในระหว่างการอัดด้วย วิธีการเอ็กซ์ทรูชั่นดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ อัตราการผลิตสูง และสามารถลดค่า Water Activity ได้ เป็นต้น โดยปัจจัยที่สำคัญของการใช้วิธี

การเอ็กซ์ทรูชั่น คือ สภาวะการทำงานของเครื่องและคุณสมบัติของวัสดุ โดยปัจจัยในด้านสภาวะการทำงานของเครื่องประกอบไปด้วย อุณหภูมิ ความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าแปลน (Die Aperture) และอัตราการเฉือน ส่วนปัจจัยสำคัญในด้านคุณสมบัติของวัสดุได้แก่ ความชื้น ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder)



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์(Extruder)

2.3.1 ประเภทของเครื่องอัดผ่านเกลียว (Extruder)

เครื่องอัดผ่านเกลียวหรือเอ็กซ์ทรูเดอร์สามารถจำแนกประเภทได้แบบ 2 แบบ คือ จำแนกตามลักษณะการทำงานและลักษณะโครงสร้างของเครื่องโดยการจำแนกตามลักษณะการทำงานสามารถแบ่งได้เป็นแบบใช้ความร้อนและไม่ใช้ความร้อน ส่วนการจำแนกตามลักษณะโครงสร้างของเครื่องสามารถแบ่งได้เป็นแบบเกลียวเดี่ยวและเกลียวคู่

1. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเกลียวเดี่ยวและเกลียวคู่

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเกลียวเดี่ยวเป็นเครื่องมือที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบัน โดยมีลักษณะทั่วไปจะมีการแบ่งโซนของสกรูอัดเป็นหลายโซน คือโซนส่งวัตถุดิบเข้า โซนนวดเพื่อการบีบนวดวัสดุ โซนผสมและเฉือนเนื้อวัสดุซึ่งการส่งวัตถุดิบผ่านเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเกลียวเดี่ยวนี้ทำได้โดยอาศัยความฝืดที่ผิวของบาเรล วัสดุจะเคลื่อนที่ไปด้านหน้าด้วยการทำงานของเกลียวและมีบางส่วนเคลื่อนที่ในทางกลับกัน (Pressure Flow และ Leakage Flow) ซึ่งเกิดจากแรงดันที่ด้านหลังของหน้าแปลนและการเคลื่อนที่ของวัสดุที่อยู่ระหว่างเกลียวและบาเรล ลักษณะเกลียวคู่ในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเกลียวคู่ (Twin-Screw Extruder) มีลักษณะเป็นเกลียวคู่กันเพื่อทำให้เกิดการผสมและป้องกันการหมุนของวัตถุดิบในบาเรลโดยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเกลียวคู่มีข้อดีหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่นในการทำงาน ควบคุมการถ่ายเทความร้อนได้ดี สามารถใช้ได้ดีกับวัสดุที่เหนียวและลื่น และเกิดการสึกหรอน้อย เป็นต้น

2. เครื่องเอ็กทรูเดอร์แบบใช้และไม่ใช้ความร้อน

การดันผ่านเกลียวแบบใช้ความร้อน (Hot Extrusion) เป็นการอัดวัสดุโดยใช้ความร้อนจากไอน้ำหรือขดลวดไฟฟ้าที่ให้ความร้อนแก่บาเรลโดยตรง หรืออาจเกิดความร้อนขึ้นในวัสดุเนื่องจากการเสียดสีของเกลียวและบาเรล ซึ่งในระหว่างการอัดจะเกิดความดันเพิ่มขึ้นที่หน้าแปลน ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีการขยายตัวสูงได้ และเมื่อวัสดุถูกดันออกจากรูหน้าแปลนจะทำให้เกิดการขยายตัวของไอน้ำและอากาศพร้อมกันในวัสดุ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำและความชื้นลดลง ซึ่งในการควบคุมการขยายตัวของอาหารทำได้โดยการควบคุมความดันและอุณหภูมิภายในเอ็กซทรูเดอร์รวมทั้งคุณสมบัติของอาหารด้วย ส่วนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูงจะใช้ความดันต่ำหรือใช้รูหน้าแปลนขนาดใหญ่ ซึ่งกรรมวิธีการการดันผ่านเกลียวอัดโดยใช้ความร้อนทั้งสองแบบเป็นกรรมวิธีที่สามารถลดการสูญเสียสารอาหารและลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ได้ และยังมีอายุการเก็บรักษานานขึ้นเนื่องจากมีค่า Water Activity ต่ำ ส่วนการดันผ่านเกลียวแบบไม่ใช้ความร้อน (Cold Extrusion) ผลิตภัณฑ์จะถูกดันผ่านเกลียวอัดเป็นชิ้นยาวๆ โดยไม่มีการให้ความร้อนรูปร่างของวัสดุจึงไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากไม่มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน เครื่องแบบนี้จะมีร่องเกลียวลึกซึ่งอัดวัตถุดิบด้วยแรงเสียดทานต่ำ

2.4 การอบแห้ง (Drying)

2.4.1 หลักการอบแห้ง

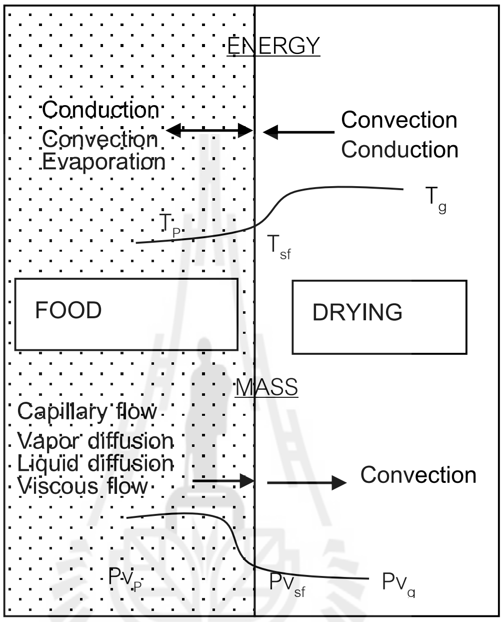
การอบแห้งเป็นการดึงความชื้นซึ่งก็คือปริมาณน้ำออกจากเนื้อวัสดุโดยมีจุดประสงค์เพื่อความเหมาะสมต่อการเก็บรักษา สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และประหยัดเนื้อที่เนื่องจากการอบแห้งทำให้มีปริมาตรและน้ำหนักที่ลดลงการอบแห้งโดยทั่วไปมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังการอบแห้ง ทั้งในเรื่องของสี กลิ่น และรสชาติ ระหว่างการอบแห้งมีกระบวนการถ่ายเทเกิดขึ้นคือ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไปยังผิวหน้าของวัสดุอาหาร และ การถ่ายเทมวลจากข้างในไปยังผิวของวัสดุอาหารเนื่องมาจากการถ่ายเทความชื้นสู่สิ่งแวดล้อมรูปที่ 2.4 พลังงานถ่ายเทสู่วัสดุอบแห้งโดย

1. การพาความร้อน เกิดขึ้นเมื่อพลังงานสำหรับการระเหยได้รับจากกระแสอากาศร้อนที่ไหลผ่านวัสดุ ดังเช่น การอบแห้งแบบถาด, belt-conveyor, flash, fluid-bed และ spray drying

2. การนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสัมผัสกับผิวร้อนดังในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหรือ rotary dryer

การส่งผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นโดยการนำเนื่องจาก internal gradient ของอุณหภูมิและมีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการพาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้น การเคลื่อนที่ความชื้นของวัสดุอาหารอาจเกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายเทที่ต่างกันคือ

- Capillary flow เนื่องจาก gradients ของ capillary suction pressure
- การแพร่กระจายของเหลวเนื่องจาก gradient ของความเข้มข้น
- การแพร่กระจายของไอเนื่องจาก partial vapor-pressure gradients
- Viscous flow เนื่องจาก total pressure gradient ซึ่งมีสาเหตุมาจากความดันภายนอกหรืออุณหภูมิที่สูง



รูปที่ 2.4 Schematic of the food drying phenomenon

ที่มา (Guillermo et al., 1997)

การถ่ายเทมวลจากผลิตภัณฑ์ไปสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นหลักๆ เนื่องจากการพาความร้อนเนื่องมาจากความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและผลิตภัณฑ์การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศอย่างเช่นในกรณีนี้ของ vacuum drying และ freeze drying

การอบแห้งแบบการพาความร้อน สภาวะขอบสำหรับ heat flux q_c และอัตราการระเหย n_w จะอยู่ในรูป

$$\text{Heat transfer} \longrightarrow q_c = h_g(T_{sf} - T_g) \qquad (2\text{-}1)$$

$$\text{Mass transfer} \longrightarrow n_w = k_g(P_{vsf} - P_{vg}) \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ h_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

k_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

T_{sf} คือ อุณหภูมิพื้นผิวผลิตภัณฑ์

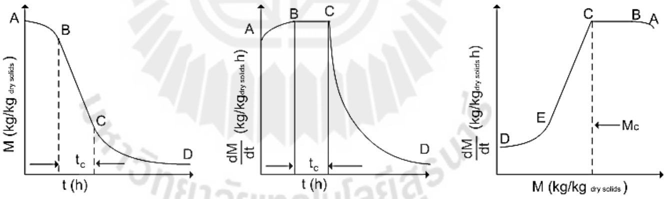
T_g คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง

P_{vsf} คือ water vapor partial pressure of surface

P_{va} คือ water vapor partial pressure of air

2.4.2 จลนศาสตร์การอบแห้ง (Drying kinetics)

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้อุณหภูมิความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดระบวนการอบแห้งแสดงในรูปที่ 2.5 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ



รูปที่ 2.5 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ดัดแปลงจาก (Brennan et al., 1990)

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุโดยความร้อนจากอากาศอบแห้งจะถ่ายเทเข้าสู่ผิววัสดุ ซึ่งความร้อนที่ให้กับวัสดุนี้จะอยู่ในรูปของความร้อนสัมผัสอุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นจนถึงประมาณอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะ

ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในรูปที่ 2.5 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยลงเมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วนั้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้าการจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้นถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้งเช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง (Vacuum Drum Drier) เป็นต้น

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้ง คือสมบัติและประเภทของความชื้นวัสดุโดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบไปด้วย ความชื้นรอบผิว (Boundary Moisture) และความชื้นในเนื้อวัสดุ (Absorbed Moisture) ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความชื้นอากาศที่ใช้อบ โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, $\overline{X}'_E$)

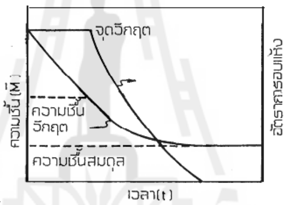
อัตราการอบ (Drying Rate) เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถบอกให้เราทราบถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยเวลา หน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อชั่วโมงหรือกิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมงโดยปกติ ในการอบแห้งวัสดุหนึ่งๆ จะมีอัตราการอบแห้ง 2 ช่วง คือ

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

2. Falling Rate Drying (R_f) คือการอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลงเมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลดในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อยๆ เพิ่มขึ้นและค่า R_f อาจจะแปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่บางประเภทอาจมีแต่ falling rate

ตลอดการอบเลยก็ได้ ทั้งนี้การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงถึงจุดความชื้นสมดุลย์

วัสดุจากสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะมีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนเมื่อนำไปทำแห้งในลักษณะชั้นบาง ที่สภาวะคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้น และ ความเร็วลมร้อน) อัตราการอบแห้งจะคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง แล้วจะเริ่มลดลงขณะที่อัตราการอบแห้งเริ่มเปลี่ยนจากคงที่เป็นลดลงเรียกว่าความชื้นจุดวิกฤตในเมล็ดพืชส่วนใหญ่จะมีแต่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อัตราการถ่ายเทมวลจึงถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลจากภายในไปยังผิววัสดุ ในระยะแรกของการอบแห้งการเคลื่อนที่ของน้ำจะเคลื่อนที่ในรูปของเหลวเนื่องจากวัสดุยังมีความชื้นสูงแต่เมื่อความชื้นลดลงมากการเคลื่อนที่ขจองน้ำจะเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ จากลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำดังกล่าวแสดงว่าความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การอบแห้งวัสดุจากสิ่งมีชีวิตในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและคงที่
ข้อมูลจาก (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

2.4.3 ความชื้นวัสดุ

ปริมาณความชื้นของวัสดุจะอธิบายอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางการค้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_w + W_d} \qquad (2\text{-}3)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจาก dry matter ของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเท

ความชื้น ความชื้นมาตรฐานแห้งหาได้จาก

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} \tag{2-4}$$

จากสมการ (2-3) และ (2-4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้งดังนี้

$$M_{db} = \frac{M_{wb}}{1 - M_{wb}} \tag{2-5}$$

$$M_{wb} = \frac{M_{db}}{1 + M_{db}} \tag{2-6}$$

เมื่อ M_{wb} คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b.) อัตราส่วน

M_{db} คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.) อัตราส่วน

W_w คือ มวลของความชื้น

W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ

2.4.4 การหาปริมาณความชื้น

การหาปริมาณความชื้นสามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีหลัก คือ วิธีโดยตรง (Direct Method) และวิธีโดยอ้อม (Indirect Method) วิธีโดยตรงจะเป็นการนำความชื้นออกจากวัสดุและวัดปริมาณความชื้นนั้นวิธีที่เป็นพื้นฐานในการหาค่าความชื้นคือ Oven method, Brown Duvel method, Infra-red lamp method ส่วนวิธีโดยอ้อมนั้นจะเป็นการใช้คุณสมบัติอื่นของวัสดุมาที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้น เช่น ความต้านทานไฟฟ้าหรือคุณสมบัติทางไดอิเลคตริก (Dielectric) วิธีการนี้เป็นวิธีที่รวดเร็วแต่ค่าที่ได้มีความถูกต้องต่ำเนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความชื้นจะต้องมีการตรวจสอบกับค่าวิธีพื้นฐาน ตัวอย่างของการหาความชื้นโดยอ้อมคือ Resistance method, Capacitance method, Relative Humidity method, Chemical method

2.5 ชนิดของเครื่องอบแห้ง

องค์ประกอบการอบแห้งจะประกอบไปด้วย 1)แหล่งพลังงานความร้อน 2) พัดลมในการพาความร้อน และ 3)ถังอบวัสดุ ซึ่งในส่วนของการเลือกใช้หรือการออกแบบเครื่องอบแห้ง จะต้องพิจารณาถึงวัสดุที่ต้องการนำมาอบแห้ง ซึ่งทฤษฎีนั้นมีจำนวนมากเนื่องจากเครื่องลดความชื้นนั้นมี

หลายรูปแบบซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวแนวทางการพิจารณาการเลือกและออกแบบเครื่องลดความชื้น การเลือกใช้ชนิดของเครื่องอบแห้งนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ ประการเช่น ลักษณะทางกายของผลิตภัณฑ์ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง การประหยัดพลังงาน ต้นทุนและการคืนทุน (Ryozo et al.,1994) เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้มีอยู่หลายประเภทจำแนกตามลักษณะของเครื่องอบแห้งออกเป็นกลุ่มหลักตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังแสดงใน ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้ง

Mode of Heat Transfer	Dryers	
	Batch operation	Continuous operation
Convection	Kiln dryer, Cabinet dryer Heat pump dryer	Tunnel dryer, Conveyor dryer Spray dryer, Heat pump dryer Fluidized bed dryer
Conduction	Heat-shelf dryer	Drum dryer
Conduction	Agitated pan dryer	Drum dryer
Radiation	Infrared dryer	
Internal generation of heat	Microwave oven	Dielectric continuous dryer Microwave tunnel
Mixed	Shelf dryer	Rotary dryer

ที่มา (สมบัติ ขอวิวัฒนา, 2529)

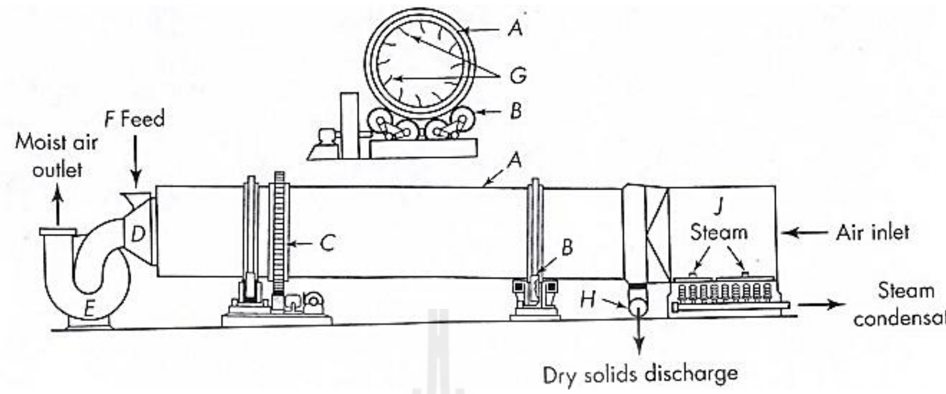
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5.1 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลายชนิดแต่นิยมใช้สำหรับอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีลักษณะเป็นแบบช่องเดียวที่รับสัมผัสความร้อนโดยตรงดังแสดงใน รูปที่ 2.7 โดยหลักการทำงานจะใช้ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุที่อบโดยตรงภายในตัวถังที่หมุน การหมุนของตัวถังทรงกระบอกจะอาศัยใบพาช่วยโรยวัสดุอบผ่านกระแสอากาศร้อนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุอบแห้งกับกระแสอากาศเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการลดความชื้นท่อลมร้อนจะต่อตรงเข้าไปในเครื่องอบแห้งโดยตรงและอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งหัวเผาหรือเครื่องทำความร้อน

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือ ตัวเครื่องอบแห้งจะทำด้วยถังทรงกระบอกหมุนวางเอียงกับแนวราบเล็กน้อย วัสดุไหลเข้าทางปลายด้านสูงแล้วไหลออกที่ปลายด้านต่ำของถัง ภายในตัวถังทรงกระบอกจะมีแผ่นครีบทำหน้าที่ตักวัสดุจากด้านล่างของถังขึ้นสู่ด้านบนแล้วไหลตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงพร้อมๆ กับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในขณะเดียวกันลมร้อนจะ

ไหลเข้ามาในถังทรงกระบอกเพื่อทำหน้าที่ลดความชื้นจากตัววัสดุในขณะที่วัสดุไหลตกลงมาทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นเป็นอย่างรวดเร็ว (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว

ลักษณะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่มีลักษณะผสมกันระหว่างเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว (Flash Dryer) คือส่วนที่วัสดุอบแห้งแขวนลอยอยู่ในอากาศ กับเครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray Dryer) คือส่วนที่ไม่ถูกตัวตักตักขึ้นไป

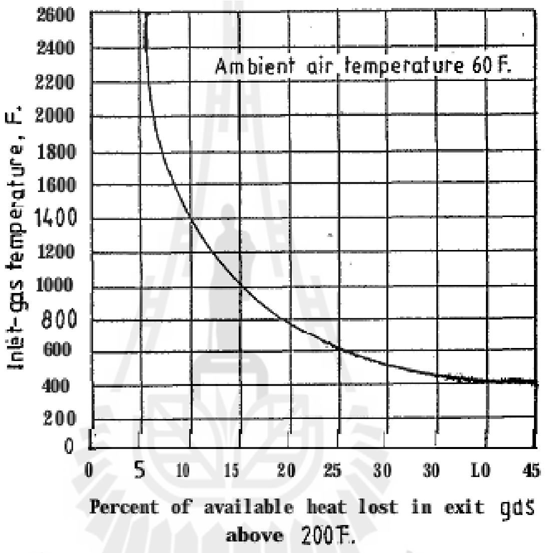
เวลาที่วัสดุอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง (Residence Time) โดยเครื่องอบแห้งแบบหมุนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 นาที ถึง 2 ชั่วโมงโดยเครื่องอบแห้งนี้จะสามารถรับวัสดุอบแห้งได้ประมาณ 5 - 15%ของปริมาตรถัง

สำหรับลักษณะการไหลของอากาศอบแห้งนั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองแบบคือ แบบไหลตาม (Co-current Flow) โดยวัสดุและอากาศจะไหลไปในทิศทางเดียวกัน และแบบไหลสวนทาง (Counter-current Flow) อากาศอบแห้งจะไหลสวนทิศกับการไหลของวัสดุ การเลือกใช้ลักษณะการไหลของอากาศแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยวัสดุที่ไวต่อความเสียหายเนื่องจากความร้อนควรจะเลือกใช้การไหลแบบตาม แต่หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในเชิงความร้อนการอบแห้งแบบไหลสวนทางจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

การไหลแบบตามกัน (Co-current Flow) อากาศร้อนทางเข้าจะสัมผัสกับวัสดุอบแห้งที่เปียก ดั้งนั้นอุณหภูมิของวัสดุยังคงอยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาสซึ่งเป็นระยะเวลาที่วัสดุยังมีความชื้นสูงอยู่ และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นของวัสดุจะเริ่มลดลง

การไหลแบบสวนทางกัน (Counter-current Flow) วัสดุที่อบแห้งจะสัมผัสกับอากาศร้อนที่ทางออก การไหลแบบนี้จะมีประโยชน์ถ้าต้องการให้วัสดุอบแห้งมีอุณหภูมิสูง แต่จะต้องไม่สูงเกินไปที่จะทำให้วัสดุแห้งเปลี่ยนคุณสมบัติ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงความร้อนพบว่าความร้อนที่สูญเสียจากกระแสอากาศร้อนที่ทางออกเมื่อไหลผ่านเครื่องอบแห้งชนิดให้ความร้อนโดยตรงหนึ่งเที่ยว รูปที่ 2.8 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่ออากาศร้อนที่ทางเข้าอุณหภูมิ 1400ºF ประมาณ 10%ของความร้อนที่ต้องสูญเสียไปกับอากาศที่ทางออก ซึ่งการสูญเสียของอากาศร้อนนี้สามารถที่จะนำกลับใช้ใหม่ได้เพื่อลดการสูญเสียความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน โดยทั่วไปอุณหภูมิอากาศร้อนที่ไหลผ่านหนึ่งเที่ยวจะลดลงเหลือ 350-400ºF ก่อนที่จะนำกระแสอากาศร้อนผ่านในเที่ยวที่สอง ซึ่งมีการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ประมาณ 95% จากความร้อนทางเข้า



รูปที่ 2.8 เปอร์เซ็นการสูญเสียความร้อนที่ทางออกเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านถังทรงกระบอก
ที่มา (Sloan, C.E., 1967), (Chemical Engineering, Vol.74, No.14 New York, McGraw-Hill)

ข้อดีและข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่

<u>ข้อดี</u>

1. การขยายขนาดจากห้องทดลองหรือจากข้อมูลทำได้ง่าย และเป็นเครื่องอบแห้งที่เสียยาก

2. สามารถลดความชื้นของวัสดุได้ตามต้องการ เพราะเราสามารถเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการอบได้

3. ราคาต้นทุนไม่สูงมากนัก

4. สามารถควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งได้ใกล้เคียงกับที่ต้องการแต่จะควบคุมได้ไม่ดีเท่ากับเครื่องอบแห้งแบบ Fluidized-bed

5. สามารถใช้ได้ทั้งอบแห้ง และเผาในเครื่องเดียวกัน

6. สามารถเลือกระบบการไหลของอากาสได้ทั้งแบบไหลตาม หรือแบบไหลสวนทางขึ้นกับว่าแบบไหนจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากัน

<u>ข้อเสีย</u>

1. การป้องกันไม่ให้อากาศร้อนรั่วเป็นไปได้ยาก

2. ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก

3. ในการอบแห้งจะเกิดฝุ่นและถูกพัดพาออกมากับอากาศ ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดฝุ่นเพิ่มขึ้น

4. เครื่องอบแห้งแบบหมุนมีน้ำหนักมาก

2.5.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

ในเครื่องอบแห้งแบบหมุนนอกจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลแล้ว ยังมีกระบวนการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในถังอบซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ Flight action, Kiln action และความเร็วลม โดยทั้งสามชนิดเป็นอิสระต่อกัน

Flight action เป็นผลจากการที่อนุภาคถูกตักด้วยตัวตัก (Flights) จากส่วนต่ำสุดของถังทรงกระบอกไปยังส่วนที่สูงกว่า และตกลงมาที่ส่วนล่างของถังทรงกระบอกในระหว่างที่อนุภาคตกลงมาก็จะเคลื่อนที่ไปด้านหน้าเนื่องจากความชันของถังทรงกระบอกด้วย

Kiln action เกิดจากอนุภาคที่ไม่ได้ถูกตักขึ้นไปด้วยตัวตัก (Flights) แต่จะเกิดการขยับเขยื้อนหรือกลิ้งอยู่ด้านล่างของถังทรงกระบอกรวมทั้งการกระดอนของอนุภาคเมื่ออนุภาคตกจากตัวตักลงสู่ด้านล่างการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปด้านหน้าเนื่องจากความชันของถังทรงกระบอก Kiln action จะมีผลมากเมื่อตัวตัก ตักได้น้อย

ความเร็วลม เมื่อความเร็วลมมากขึ้นแรงที่ใช้พัดพาอนุภาคจะมากขึ้นด้วย กรณีที่เป็นการเคลื่อนที่แบบไหลตามอากาศร้อนอนุภาคจะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ถ้ากรณีที่ไหลสวนทางกับอากาศร้อนอนุภาคจะเคลื่อนที่ได้ช้าลง

2.6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำระเหยมีหน่วยเป็น MJ/kg-water โดยพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังมี 2 ส่วนดังนี้

2.6.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

คือพลังงานที่เกิดจากการอุ่นอากาศลมร้อนด้วย LPG เขียนเป็นสมการได้ดังสมการ

$$\text{Energy} = \frac{\text{HHV} \times \text{M}_{\text{LPG}}}{\text{t} \times 3600} \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่ Energy คือ พลังงานที่เข้าไปในระบบ (kW)

HHV คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)

M_{LPG} คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg)

t คือเวลาในการอบแห้ง (hr)

2.6.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากมอเตอร์ต้นกำลังต่างๆ

หาได้จากผลคูณของแรงดันมีหน่วยเป็นโวลต์คูณด้วยกระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์ เขียนเป็นสมการออกมาได้ดังสมการ

$$P=EI \qquad (2\text{-}8)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

E คือ แรงดัน (V)

I คือ กระแส (A)

กำลังไฟฟ้าหมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ในเวลา1วินาทีกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าคำนวณได้จากพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้าใช้ไปในเวลา1วินาทีเขียนเป็นสมการออกมาได้ดังสมการกำลังไฟฟ้า x เวลา=พลังงานไฟฟ้า

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{\text{T}_{\text{Energy}} \times \text{t} \times 3600}{\text{W}_{\text{loss}}} \qquad (2\text{-}9)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg-water)

T_{Energy} คือ พลังงานรวมที่เข้าไปในระบบ (kW)

t คือเวลาในการอบแห้ง (hr)

W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(สุระ ตันดี, 2553) ได้ศึกษาคุณลักษณะการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องทำการทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่เวลาต่างกันจากการทดสอบพบว่าความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาการอบแห้งอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้นจุดที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในการทดลองนี้คือความเร็วลมร้อน 8 เมตรต่อวินาทีและอุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียสทำให้กากมันสำปะหลังมีอัตราส่วนความชื้นคงที่เท่ากับ 0.07ความชื้น 7.69 %มาตรฐานเปียกใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 2 ชั่วโมงเมื่อความชื้นของกากมันสำปะหลังลดลงค่าพลังงานความร้อนที่ได้สูงขึ้น

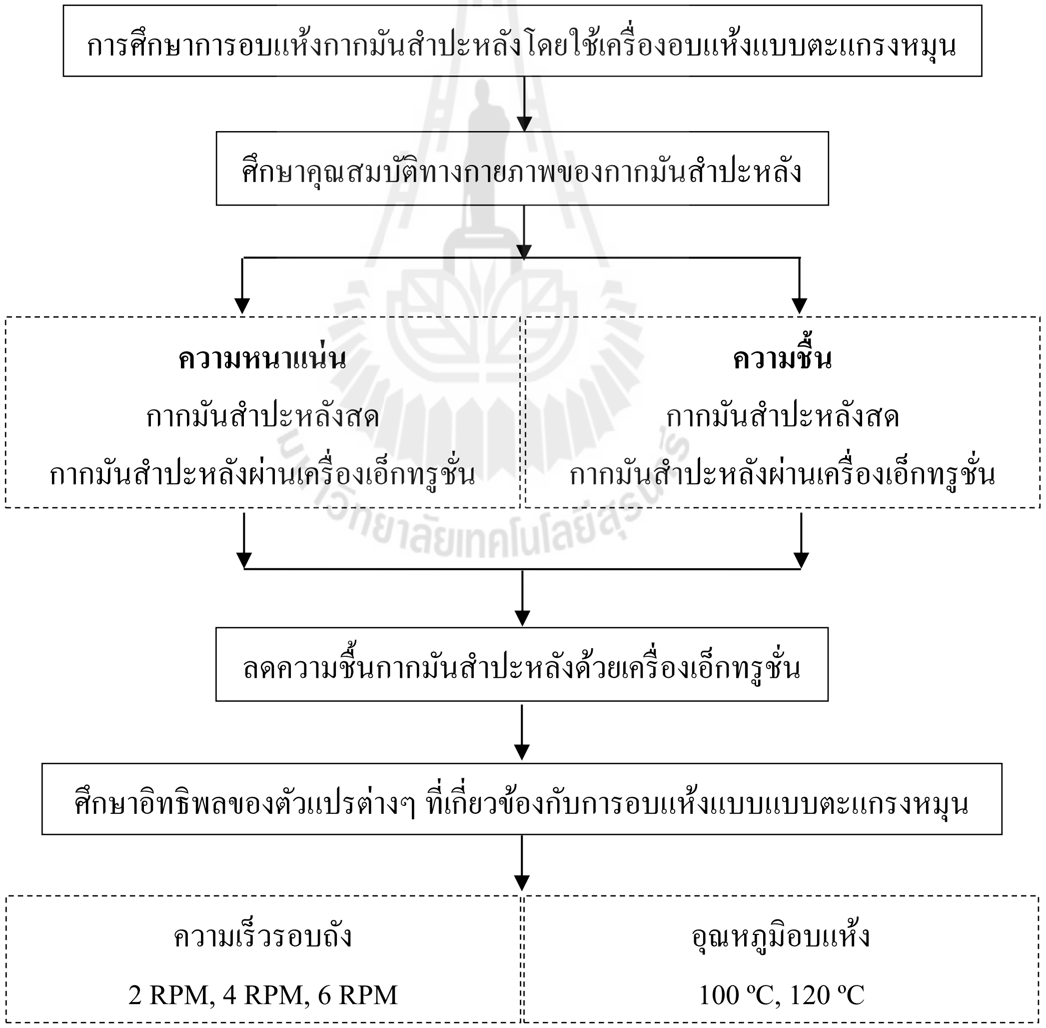
(พิพัฒน์ อมตฉายา, 2548) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอัตราการหมุนของถังความเร็วลมอัตราการป้อนพริกและความลาดเอียงของถังโดยสภาวะที่เขาแนะนำว่าเหมาะสมคืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 140°C อัตราการไหลอากาศ 1 m/s อัตราการหมุนของถัง 6 rpm อัตราการป้อนพริก 0.5 kg/min ความลาดเอียงของถัง 0.3° ซึ่งจะสามารถลดความชื้นพริกจำนวน 9 kg ความชื้นเริ่มต้น 78-84%w.b. ให้เหลือ 15%w.b.โดยใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง

(ไพบูลย์ โรจน์วิบูลย์ชัย, 2533) ได้ทำการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งขึ้นอยู่กับมวลข้าวโพดที่ค้างอยู่ภายในเครื่องอบแห้ง (hold-up) โดยเมื่อปริมาณข้าวโพดเพิ่มขึ้นความสิ้นเปลืองพลังงานจะน้อยโดยทั่วไปมวลที่ค้างอยู่ในถังควรมีค่าประมาณ 10-15%ของปริมาตรถัง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความชื้นของข้าวโพดด้วย โดยมีความสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง

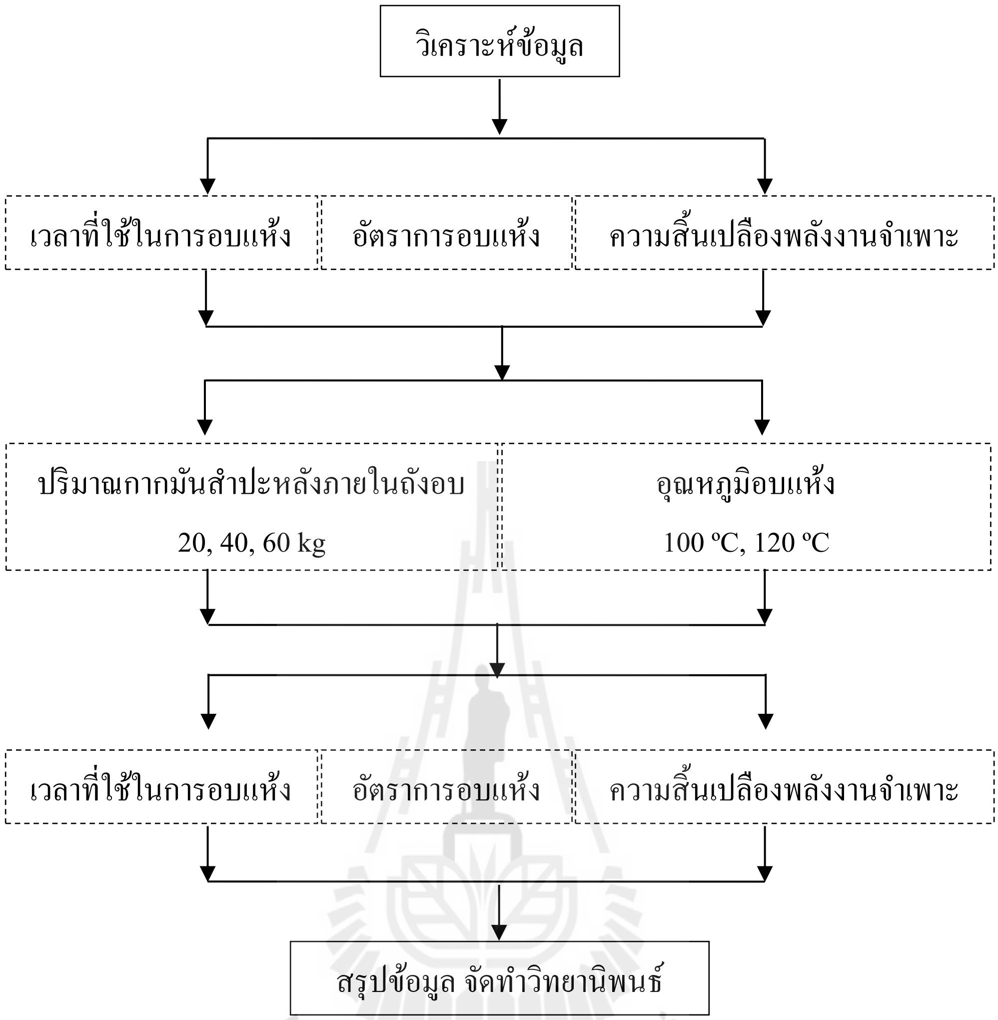
(วีรชัย และคณะ, 2552) ได้ศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่พบว่าผลจากการทดลองเพื่อทำการประเมินสมรรถนะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งโรตารีต้นแบบในเทอมของอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำการระเหยน้ำออกจากชิ้นมันได้ในอัตรา 140.18กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ 10.07 MJ/kg-waterหากมันเส้นอยู่ในเครื่องอบแห้งนาน 4.712ชั่วโมง สามารถแห้งได้จนถึงความชื้นที่ต้องการ (ต่ำกว่า 13%w.b.)

บทที่ 3
เครื่องมือและการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง เตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่น และ การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนโดยมีขั้นตอนการทดลองตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

3.1 การศึกษาคุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง

คุณสมบัติของกากมันสำปะหลังนั้นมีความสำคัญ และมีผลต่อกระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การอบแห้ง และการลำเลียง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของกากมันสำปะหลังเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆประกอบไปด้วยค่าความชื้น ค่าความหนาแน่น ลักษณะปรากฏ การจับตัวของกากมันสำปะหลัง และค่าความร้อนของกากมันสำปะหลัง

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. กากมันสำปะหลังสดจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (บริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด) รูปที่ 3.2

2. กากมันสำปะหลังที่ได้จากการลดความชื้นด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ รูปที่ 3.3

3. ตู้อบแห้งแบบลมร้อน (Binder) สำหรับหาค่าความชื้น รูปที่ 3.4 มีพิกัด การใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Temperature Ranges	:	5 ถึง 300 °C
Internal Dimension	:	31.5 in x 23.6 in x 19.7 in

4. โถดูดความชื้น (OH-35 S/N 0902911-07) รูปที่ 3.5

5. เครื่องชั่งสองตำแหน่ง (Sartorius, ED3202S-CW) รูปที่ 3.6 มีพิกัดการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Capacity	:	3,200 g
Readability	:	0.01 g
Repeatability (std deviation)	:	± 0.01 g
Pan Size (mm)	:	180.3 x 180.3 mm
Calibration Type	:	Internal calibration
Calibration Weight (g)	:	2,000 g
Response Time (average)	:	1.1 seconds

6. ภาชนะทรงกระบอก (เพื่อหาค่าความหนาแน่น) รูปที่ 3.7

7. Calorimeter C5000 Control (IKA® C5000) รูปที่ 3.8 มีพิกัดการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Measuring range max	:	40,000J
Measuring time adiabatic approx.	:	15 min
Measuring time dynamic approx.	:	10 min
Measuring time isoperibol approx.	:	22 min

รูปที่ 3.2 กากมันสำปะหลังสด

รูปที่ 3.3 กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอัดรีด

รูปที่ 3.4 ตู้อบแห้งแบบลมร้อน

รูปที่ 3.5 โถดูดความชื้น

รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งสองตำแหน่ง

รูปที่ 3.7 ภาชนะทรงกระบอก

รูปที่ 3.8 Calorimeter

3.1.2 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

- ค่าปริมาณค่าความร้อนของกากมันสำปะหลัง (HHV) ค่าปริมาณความร้อนของกากมันสำปะหลังทำการวิเคราะห์โดยใช้มาตรฐาน ASTM E711 โดยนำกากมันสำปะหลังที่ได้จากการอบแห้งแบบตะแกรงหมุนมาเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์

- การหาค่าความชื้นอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 ความชื้นกากมันสำปะหลังสามารถทำได้โดยใช้วิธีการหาความชื้นทางตรงด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (อบจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างคงที่) ชั่งน้ำหนัก

ตัวอย่างกากมันสำปะหลังด้วยตาชั่งละเอียด ±0.01 (รูปที่ 3.9) จากนั้นคำนวณหาความชื้นของกากมันสำปะหลังโดยใช้สมการที่ (3-1)

$$MC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100 \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นกากมันสำปะหลังมาตรฐานเปียก (% w.b.)

m_d คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

m_w คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังก่อนอบ (g)

(a)กากมันสำปะหลังก่อนอบ

(b)กากมันสำปะหลังหลังอบ

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกากมันก่อนอบและหลังอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- การหาค่าความหนาแน่น ค่าความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังจะอยู่ในรูปของความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งสำหรับการอบแห้งกากมันสำปะหลัง ค่าความหนาแน่นปรากฏเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตรของกากมันสำปะหลังทำได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของกากมันสำปะหลัง รูปที่ 3.10 โดยใช้ภาชนะทรงกระบอกในการหาปริมาตรสมการที่ (3-2)

$$\rho_b = \frac{m}{V} \qquad (3\text{-}2)$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)

m คือ มวลของกากมันสำปะหลังในภาชนะ (kg)

V คือ ปริมาตรของภาชนะ (m^3)

รูปที่ 3.10 การทดสอบหาความหนาแน่นปรากฏ

- การศึกษาลักษณะปรากฏของกากมันสำปะหลัง เมื่อออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ คุณสมบัติทั่วไปของกากมันสำปะหลังประกอบไปด้วย การจับตัวกันของกากมันสำปะหลังเมื่อออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวทดสอบโดยการสังเกตุด้วยตาเปล่า และการสัมผัสด้วยมือเปล่าเพื่อเป็นการบ่งบอกคุณลักษณะที่ปรากฏของกากมันสำปะหลังสดเบื้องต้น

3.2 เตรียมกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการลดความชื้นทางกลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่น

จากการทดสอบเบื้องต้นโดยนำกากมันสำปะหลังสดซึ่งออกจากกระบวนการผลิตแป้งมาทำการอบแห้งโดยไม่ผ่านกระบวนการลดความชื้นทางกล (Extrusion) ปรากฏว่ากากมันสำปะหลังที่ได้ออกมามีสองส่วนคือส่วนที่ผ่านตะแกรงยังมีความชื้นสูงและส่วนที่ค้างภายในตะแกรงซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ขนาดประมาณ 10 cm และยังมีความชื้นสูง รูปที่ 3.11(a) โดยที่ผิวภายนอกของลูกกลมๆมีลักษณะแห้งแต่ความชื้นภายในยังสูงทำให้เมื่อจัดเก็บจะเกิดเชื้อรา ดังนั้นก่อนการอบแห้งครั้งนี้จึงได้ใช้กระบวนการรีดน้ำ (Dewatering) ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) ในการลดปริมาณน้ำในกากมันสำปะหลังเบื้องต้น ก่อนการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

การรีดน้ำ (Dewatering) ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) รูปที่ 3.12 จะใช้ขนาดรูหัวดาย 6 mm ความเร็วรอบ 70 rpm มาเป็นสภาวะหลักในการเตรียมกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

(a)กากมันสำปะหลังค้างภายในตะแกรง (b)กากมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรง

รูปที่ 3.11 กากมันสำปะหลังที่อบแห้งโดยไม่ผ่านกระบวนการลดความชื้นทางกล(Extrusion)

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

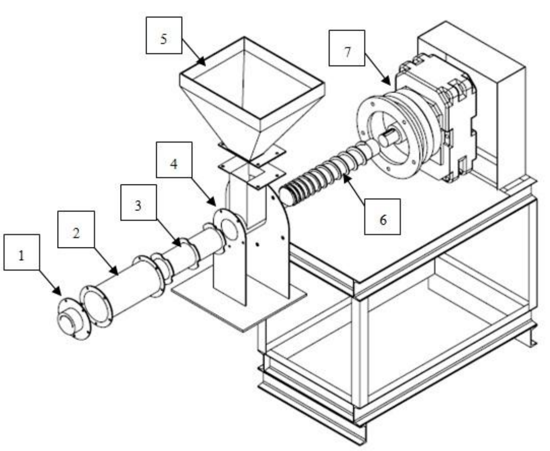
1. กากมันสำปะหลังโดยใช้กากมันสำปะหลังสดจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (บริษัท อุตสาหกรรมแป้งโคราช จำกัด)

2. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

3.2.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder)

- เครื่องทรูเดอร์ (Extruder)

รูปที่ 3.12 ภาพประกอบเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder)



1. ชุดหัวดาย (Die)
2. ชุดกระบอกรับน้ำ (Case)
3. ชุดตะแกรง (Sieve)
4. ชุดลำเลียง (Feeder Case)
5. ชุดป้อน (Hopper)
6. สกรูอัด (Screw)
7. ชุดถ่ายทอดกำลัง (Power Train)

รูปที่ 3.13 แบบร่างประกอบเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์
(วีระศักดิ์ และคณะ, 2556).

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้สามารถลดความชื้นบางส่วนจากกากมันสำปะหลังได้ซึ่งความชื้นส่วนนี้ส่วนใหญ่เป็นน้ำที่อยู่ภายนอกเซลล์ของกากมันสำปะหลังที่สามารถใช้วิธีทางกลในการอัดรีดน้ำส่วนนี้ออกมาได้ในระดับหนึ่งและสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของกากมันสำปะหลังสดได้โดยชุดเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีส่วนประกอบดังนี้(รูปที่ 3.13)

1. สกรูอัดรีด (Screw) มีระยะพิตช์เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของสกรูมี 3 ช่วง โดยในช่วงแรกจะมีระยะพิตช์กว้างที่สุดและลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวจึงเป็นการเพิ่มแรงบีบอัดกากมันสำปะหลังเพื่อให้รีดน้ำออก

2. หัวดาย (Die) เป็นทางออกของวัสดุที่ถูกอัดรีด (Extruded) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูกลมขนาดเล็กเพื่อทำให้เกิดการอั้นหรือเกิดแรงอัดตัวเพิ่มขึ้นเพื่อประโยชน์ในการดึงน้ำออกจากกากมันสำปะหลังสด

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

4. ตะแกรง (Sieve) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งทำจากแผ่นเหล็กตะแกรงขนาดรู 1 mm ทำหน้าที่เสมือนบาเรลในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทั่วไปซึ่งน้ำที่ถูกบีบออกจากกากมันสำปะหลังจะไหลรอดรูตะแกรงลงไปยังส่วนรองรับน้ำ

5. ชุดรองรับน้ำ (Case) ทำหน้าที่รองรับและรวบรวมน้ำที่ถูกบีบอัดออกจากกากมันสำปะหลังและไหลผ่านรูตะแกรงลงมาซึ่งชุดรองรับน้ำนี้มีลักษณะเป็นแจ๊คเก็ตทรงกระบอกซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเพื่อให้มีพื้นที่ในการรองรับน้ำ และมีรูระบายน้ำออกสู่ด้านนอกเครื่อง

6. ชุดลำเลียง (Feeder Case) คือชุดอุปกรณ์ที่ต่อเนื่องมาจากตัวป้อนวัสดุ (Hopper) ซึ่งทำหน้าที่รองรับกากมันสำปะหลังสดจากตัวป้อนวัสดุและมีช่องบังคับให้วัสดุไหลลงสู่ชุดสกรูอีกครั้งหนึ่ง

- ลักษณะกากมันสำปะหลังเมื่อผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

กากมันสำปะหลังที่ผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่สภาวะความเร็วรอบ 70 rpm และขนาดรูหัวดาย 6 mm ทำให้ได้กากอัดรีดที่มีความชื้น 68.9%w.b. ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นกากมันสำปะหลังสดประมาณ 8%w.b. (ความชื้นเริ่มต้นกากมันสำปะหลังสดเท่ากับ 76.7%w.b.) ซึ่งความชื้นดังกล่าวถือว่ายังคงมีค่าสูงอยู่ซึ่งเป็นเพราะข้อจำกัดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้หลักการทางกลเพียงอย่างเดียวทำให้สามารถบีบน้ำที่อยู่ในกากมันสำปะหลังได้บางส่วน คือ สามารถบีบน้ำอิสระซึ่งเป็นน้ำที่แทรกซึมอยู่ระหว่างอนุภาคของกากมันสำปะหลังแต่ไม่สามารถบีบน้ำที่อยู่ภายในเซลล์กากมันสำปะหลังได้เนื่องจากขนาดอนุภาคของกากมันสำปะหลังมีขนาดเล็กมากแต่อย่างไรก็ตามกากอัดรีดที่ได้มีลักษณะที่ดีขึ้น คือ มีความหมาด ร่วน แตกตัวได้ง่ายขึ้น และไม่จับตัวเป็นก้อน ดังรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ชัดเจนว่ากากมันสำปะหลังสดมีลักษณะชื้นมากและจับตัวกันเป็นก้อนแต่กากอัดรีดจะมีลักษณะที่สังเกตได้ว่ามีความชื้นลดลงแตกตัวได้ง่ายและไม่จับตัวเป็นก้อน ซึ่งลักษณะปรากฏของกากมันอัดรีดดังกล่าวจะสามารถนำไปเข้าสู่กระบวนการลดความชื้นขั้นต่อไปได้ง่ายขึ้นโดยใช้เครื่องอบลมร้อนที่รูปแบบต่างๆ เช่น เครื่องอบแบบตะแกรงหมุน (Rotary Screen Dryer)เครื่องอบแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidize Bed Dryer) และเครื่องอบแบบกระบะ (Bed Dryer) เป็นต้น โดยพลังงานจำเพาะในการอัดรีดน้ำออกจากกากมันสำปะหลังที่สภาวะดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0.32 MJ/kg-water

รูปที่ 3.14 ลักษณะปรากฏของกากมันสำปะหลังผ่านการอัดรีด

3.2.3 วิธีการเตรียมกากมันสำปะหลัง

นำกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานมาผ่านกระบวนการลดความชื้นทางกลโดยหลักการเอ็กซ์ทรูชั่นโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ รูปที่ 3.12 ขนาดรูหัวดาย 6 mm ความเร็วรอบ 70 rpm นำกากมันสำปะหลังที่ได้จากการลดความชื้นทางกลจัดเก็บในภาชนะปิดสนิดเพื่อเตรียมทำการทดลอง

3.3 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนจะทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน ทำการทดสอบ 2 ขั้นตอน คือ (1) ใช้สภาวะในการศึกษาคือ อุณหภูมิในการอบแห้ง (100°C, 120°C) และ ความเร็วรอบในการหมุน (2 RPM, 4 RPM, 6 RPM) (2) ใช้สภาวะในการศึกษาคือปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ (20 kg, 40 kg, 60 kg), อุณหภูมิในการอบแห้ง (100°C, 120°C) และ ความเร็วรอบในการหมุนจากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ (1) โดยเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสม การประเมินสมรรถนะการอบแห้งจะประเมิณจากอัตราการอบแห้ง ประเมินการใช้พลังงานด้วยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และระยะเวลาในการอบแห้ง

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. กากมันสำปะหลังที่ได้จากการลดความชื้นด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ รูปที่ 3.15

2. เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนมีลักษณะเป็นห้องอบแห้งทรงลูกบาศก์หุ้มฉนวนโดยภายในเป็นถังตะแกรงทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm ยาว 120 cm ปริมาตร 0.5 m^3 ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (Mitsubishi, 2.2 kW, 3 phase, 50 Hz) ปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (INVT, Model : CHF 100-004 G/5R5P-4, Power 4 kW/5.5 kW) ป้อนลมร้อนเข้าภายในถังตะแกรงทรงกระบอกด้วยพัดลมอัดแรงดันขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (Mitsubishi, 2.2 kW, Single Phase, Type DT862-4, Serial 405) อัตราการไหลของอากาศร้อน 0.25 m^3 ซึ่งลมร้อนที่ได้เกิดจากห้องเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงจากแก๊สผสมกับอากาศแวดล้อมภายนอก การป้อนวัตถุดิบจะป้อนที่ด้านบนโดยถังตะแกรงทรงกระบอกจะมีช่องป้อนวัตถุดิบและถ่ายวัตถุดิบออกสามารถเปิดปิดได้ รูปที่ 3.16

3. แหล่งความร้อนใช้วิธีการเผาไหม้อากาศภายในท่อโดยตรงด้วยหัวเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงจากแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) รูปที่ 3.17

4. Thermocouple Type K รูปที่ 3.18 มีพิกัดการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Temperature range °C (continuous)	:	0 ถึง +1100 °C
Temperature range °C (short term)	:	-180 ถึง +1300 °C

5. เครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด (Infrared Moisture Determination Balance) ยี่ห้อ Kett รุ่น FD610 รูปที่ 3.19 มีพิกัดการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Measurement Range	:	0 – 100% w.b., 0 – 100% solid
Minimum Indication	:	0.1% 0r 5mg
Accuracy	:	± 0.1%

Measurement Weigh	:	5-70 g
Dimension Pan	:	95 mm Dai., 10 mm Deep
Temperature Range	:	65 – 159 ºC

6. เครื่องชั่ง (METTLER TOLEDO, MTL, IND221, พิกัด 1500 kg, ความระเอียด 0.01 kg) รูปที่ 3.20

7. มิเตอร์ไฟฟ้า รูปที่ 3.21

8. Multi-Parameter Ventilation Meter (VELOCICALC® Plus) รูปที่ 3.22 มีพิกัดการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Measurement Range	:	1.27 to 78.7 m/s
Accuracy	:	±1.5% at 10.16 m/s
Resolution	:	0.01 m/s
Measurement Range	:	0 to 95% rh
Accuracy	:	±3% rh
Resolution	:	0.1% rh

รูปที่ 3.15 กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอัดรีด

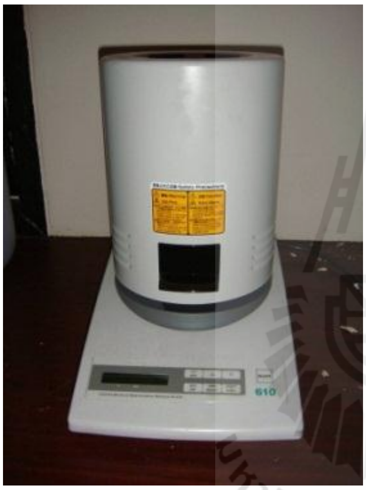
รูปที่ 3.16(a) เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

รูปที่ 3.16(b) เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

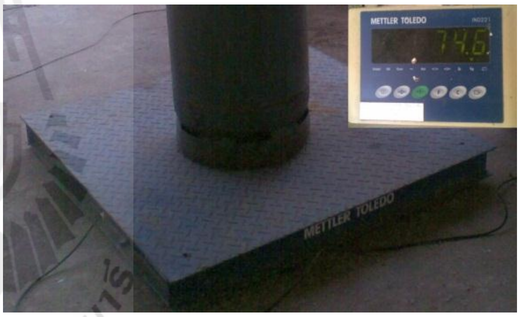
รูปที่ 3.16(c) เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

รูปที่ 3.17 แหล่งความร้อน

รูปที่ 3.18 Thermocouple Type K

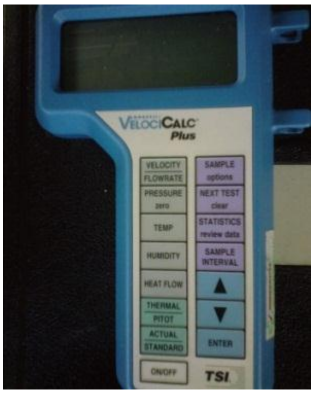


รูปที่ 3.19 เครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด



รูปที่ 3.20 เครื่องชั่ง

รูปที่ 3.21 มิเตอร์ไฟฟ้า

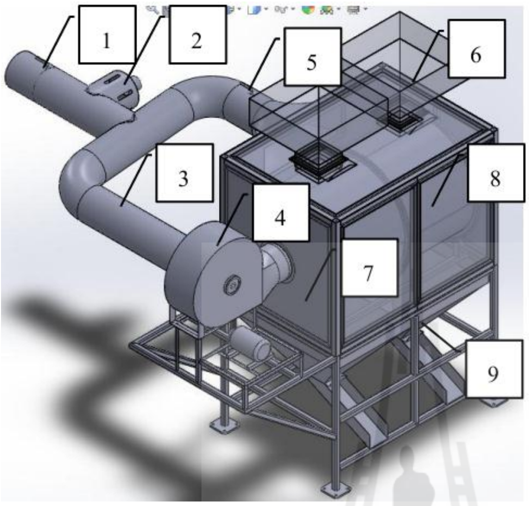


รูปที่ 3.22 Multi-Parameter Ventilation Meter

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.2 รายระเอียดเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน (Rotary screen dryer)

เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนมีลักษณะเป็นห้องอบแห้งทรงลูกบากศ์หุ้มฉนวน โดยภายในเป็นถังตะแกรงทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.23 โดยมีรายระเอียดดังนี้



1. ท่ออากาศเข้าและวาล์ว
2. ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง
3. ท่อลมร้อนหุ้มฉนวน
4. Blower
5. ท่ออากาศวนกลับและวาล์ว
6. Hopper และช่องป้อนวัสดุ
7. ฝาปิดบุฉนวน 4 ด้าน
8. ถังตะแกรงทรงกระบอก
9. Hopper รับกากมันสำปะหลังอบแห้ง

รูปที่ 3.23 รายระเอียดเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

1. ท่ออากาศเข้าและวาล์ว เป็นส่วนทางเข้าของอากาศใหม่ก่อนผสมกับอากาศร้อนที่ผ่านการเผาไหม้และส่วนนี้จะมีวาล์วปรับปริมาณอากาศเข้าเพื่อความเหมาะสมในการอบแห้ง

2. ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นส่วนที่เผาไหม้อากาสโดยใช้หัวเผาใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

3. ท่อลมร้อนหุ้มฉนวน ในส่วนของท่อลมร้อนจะหุ้มฉนวนด้วยใยแก้วหนา 20 mm

4. Blower ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า Mitsubishi, 2.2 kW, Single Phase, Type DT862-4, Serial 405 อัตราการไหลของอากาศร้อน 0.25 m^3 ซึ่งลมร้อนที่ได้เกิดจากห้องเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงจากแก๊สผสมกับอากาศแวดล้อมภายนอก ด้านทางออกของ Blower มี Thermocouple Type K เป็นอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าถังอบ

5. ท่ออากาศวนกลับและวาล์ว เป็นท่อวนลมร้อนภายในถังอบกลับเพื่อลดการสูญเสียความร้อนทิ้งเนื่องจากลมร้อนที่ออกมายังมีอุณหภูมิสูงอยู่

6. Hopper และช่องป้อนวัสดุ เป็นช่องที่ใช้ป้อนวัสดุเข้าถังอบเนื่องจากการป้อนเป็นการป้อนด้านข้างของถังอบ

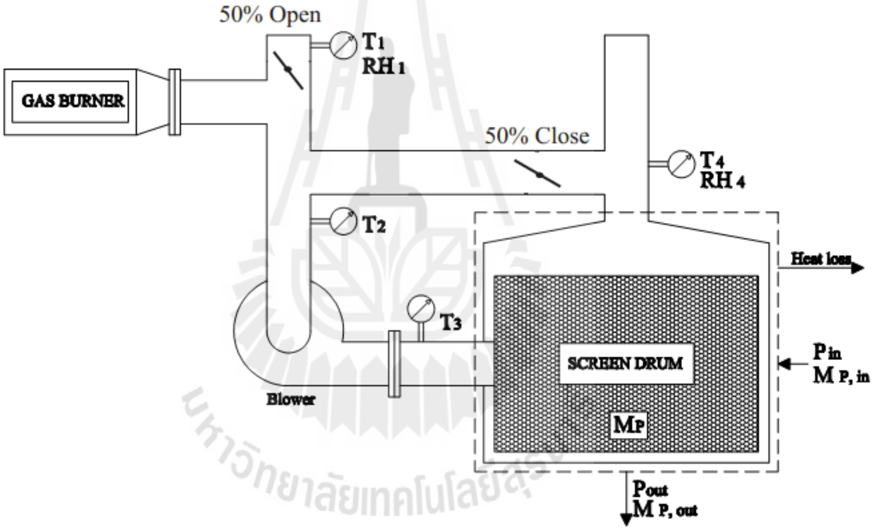
7. ฝาปิดบุฉนวน 4 ด้าน ห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมมีฝาปิดทั้ง 4 ด้านโดยฝาแต่ละด้านบุด้วยฉนวนใยแก้วหนา 20 mm ฝาปิดสามารถเปิดได้ 2 ด้าน

8. ถังตะแกรงทรงกระบอก เป็นถังตะแกรงหมุนที่อยู่ภายในห้องอบเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm ยาว 120 cm ปริมาตร 0.5 m^3 ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า Mitsubishi, 2.2 kW, 3 phases, 50 Hz ปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ INVT, Model: CHF 100-004 G/5R5P-4, Power 4 kW/ 5.5 kW เป็นส่วนที่บรรจุกากมันสำปะหลังสำหรับอบแห้ง โดยถังตะแกรงทรงกระบอกนี้จะมีช่องป้อนและช่องปล่อยวัสดุที่ด้านข้างถังอบ โดยมีแผ่นเลื่อนเปิดปิด

9. Hopper รับกากมันสำปะหลังอบแห้ง เมื่อกากมันสำปะหลังร่วงจากตะแกรงจะตกลงด้านล่างโดยมี Hopper เป็นตัวรองรับ หรือในกรณีที่อบแห้งเสร็จแล้วก็จะเป็นตัวรับวัสดุแห้งโดยด้านล่างของ Hopper จะมีแผ่นเลื่อนเปิดปิด

3.3.3 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองโดยการเก็บข้อมูลต่างๆดัง รูปที่ 3.24 โดยมีขั้นตอนการเก็บข้อมูลดังนี้



รูปที่ 3.24 แผนผังการเก็บข้อมูล

1 นำกากมันสำปะหลังที่เตรียมไว้จากการลดความชื้นทางกลโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาหาค่าความชื้นก่อนอบและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนอบ เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มีปริมาณตัวอย่างจำนวนมากการหาความชื้นจึงใช้การหาแบบ Infra-red lamp method เนื่องจากตู้อบแห้งแบบลมร้อนไม่เพียงพอต่อการอบหาความชื้น

2. ทำการทดลองด้วยสภาวะที่กำหนดไว้โดยดูจากรูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย อัตราการไหลอากาศคงที่เท่ากับ 0.25 m^3/s พร้อมทั้งเก็บข้อมูลตามแผนผังการเก็บข้อมูล รูปที่ 3.24 โดย ในการเก็บข้อมูลจะเก็บข้อมูลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
- ความชื้นกากมันสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องอบ	- สุ่มเก็บตัวอย่างทุกครั้งที่เริ่มทำการทดลองด้วยสภาวะอื่นๆ หาความชื้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด	- ความชื้นเริ่มต้น - น้ำหนักน้ำเริ่มต้น - น้ำหนักมวลแห้งเริ่มต้น
- น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง	- เก็บตัวอย่างที่ร่วงผ่านรูตะแกรงชั่งน้ำหนัก โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นในถังอบเหลือน้อยกว่า 17.65 % d.b.	- สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด - น้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง(มวลแห้ง)
- ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง	- เก็บตัวอย่างที่ร่วงผ่านรูตะแกรงไปหาหาความชื้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นในถังอบเหลือน้อยกว่า 17.65 % d.b.	- ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรง - น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น - น้ำหนักมวลแห้งที่เวลาต่างๆ
- ความชื้นกากมันสำปะหลังภายในถังอบแห้ง	- หยุดหมุนถังอบสุ่มตัวอย่างนำไปหาหาความชื้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด โดยเก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนกว่าความชื้นเหลือน้อยกว่า17.65% d.b.	- สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในถังอบ - ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง - อัตราการอบแห้งกากมันสำปะหลัง - น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น
- น้ำหนักของแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง	- ชั่งน้ำหนักแก๊สก่อนทำการทดลองและระหว่างทำการทดลองให้ชั่งน้ำ	- ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการเก็บข้อมูลการทดลอง (ต่อ)

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
	หนักทุก 30 นาที พร้อมกับการเก็บตัวอย่างต่างๆ น้ำหนักที่ใช้คือน้ำหนักก่อนลบด้วยน้ำหนักหลังใช้	
- พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง	- จดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไประหว่างทำการทดลองโดยใช้ค่าพลังงานก่อนใช้ลบด้วยค่าพลังงานหลังใช้โดยอ่านค่าทุก 30 นาทีพร้อมกับการเก็บตัวอย่างต่างๆ	- ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

3. ข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ, อัตราการอบแห้ง, ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, สัดส่วนการลอดผ่านรูตะแกรง, สัดส่วนการคงค้างภายในถังอบแห้ง

4. นำสภาวะที่เหมาะสมโดยดูจากค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมาใช้พิจารณาเพื่อทดสอบหาปริมาณภายในถังตะแกรงทรงกระบอกที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้กากมันสำปะหลัง 20 kg, 40 kg และ 60kg คิดเป็น 7%, 14% และ 21% ของถังตะแกรงทรงกระบอก

- ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการคือ 14.9% d.b. ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย มีหน่วยเป็น MJ/kg-water โดยการหาปริมาณน้ำที่ถูกระเหยไปจนเหลือความชื้น 14.9% d.b. จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง โดยพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังมี 2 ส่วนดังนี้

1. ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนเป็นความสิ้นเปลืองที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการทดลองนี้ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (3-3)

$$\text{Energy} = \frac{HHV_{LPG} \times M_{LPG}}{t \times 3600} \tag{3-3}$$

เมื่อ Energy คือ พลังงานที่เข้าไปในระบบ (kW)

HHV_{LPG} คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)

M_{LPG} คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (hr)

2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากมอเตอร์ต้นกำลังต่างๆ (kW) ซึ่งดูจากมิเตอร์ไฟฟ้า

ดังนั้นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) สมการที่ (3-4)

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{T_{Energy} \times t \times 3600}{W_{loss}} + SEC_{Extruder} \quad (3\text{-}4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg-water)

T_{Energy} คือ พลังงานรวมที่เข้าไปในระบบ (kW)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (hr)

W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่หายไประหว่างลดความชื้น (kg)

$SEC_{Extruder}$ คือ พลังงานจำเพาะในการลดความชื้นทางกลเท่ากับ 0.32 MJ/kg-water

- อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) โดยคิดจากความชื้นที่ออกจากวัสดุต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีหน่วยเป็น (% d.b.)/hr สมการที่ (3-5)

$$DR = \frac{M_{pi} - M_{pf}}{t} \quad (3\text{-}5)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (% d.b./hr)

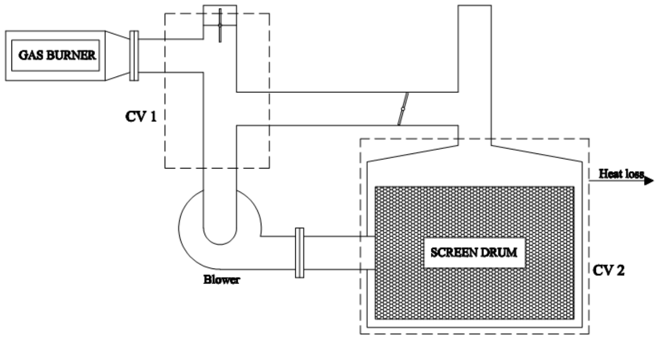
M_{pi} คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง (% d.b.)

M_{pf} คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง (% d.b.)

t คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

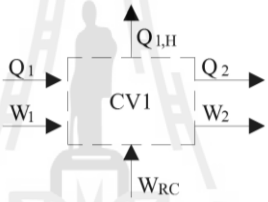
- สมดุลพลังงาน และ สมดุลมวล

ในการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน และ สมดุลมวลจะแบ่งเป็น 2 ปริมาตรควบคุม คือ ปริมาตรควบคุม 1 (CV1) และปริมาตรควบคุม 2 (CV2) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 โดยปริมาตรควบคุม 1 (CV1) จะเป็นปริมาตรควบคุมของระบบแหล่งความร้อน และ ปริมาตรควบคุม 2 (CV2) จะเป็นปริมาตรควบคุมของถังอบ โดยสามารถหาได้ดังนี้



รูปที่ 3.25 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบ

- ปริมาตรควบคุม 1 (CV1) ปริมาตรควบคุมของระบบแหล่งความร้อน



รูปที่ 3.26 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบความร้อน

สมดุลพลังงาน จากรูปที่ 3.26 ปริมาตรควบคุม 1 (CV1) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมและปริมาณความร้อนที่ได้รับจากตัวอุ่นอากาศสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$Q_{l,H} = Q_1 - Q_2 \tag{3-6}$$

$$Q_{l,H} = Q_1 - \dot{m}_a[C_a+(W_1C_v)](T_2-T_1) \tag{3-7}$$

เมื่อ Q_1 คือ ความร้อนที่เข้าระบบ (kW)

$Q_{l,H}$ คือ ความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมของระบบความร้อน (kW)

Q_2 คือ ความร้อนที่ออกจากระบบ (kW)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง ($kg_{dry\ air}/s$)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (kJ/$kg_{dry\ air}$ °C)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg_{water} °C)

W_1 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศใหม่ (kg_{water}/$kg_{dry\ air}$)

T_1 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

T_2 คือ อุณหภูมิหลังผ่านห้องผสมอากาศ (°C)

สมดุลมวล จากรูปที่ 3.26 ปริมาตรควบคุม 1 (CV1) เมื่อพิจารณาที่ปริมาณควบคุมสามารถหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผสมได้ดังนี้

$$W_2 = (1-RC)\, W_1 + RCW_{RC} \tag{3-8}$$

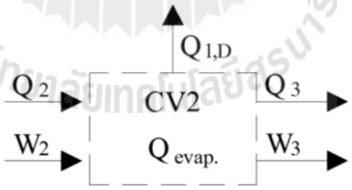
เมื่อ W_2 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังผสม (kg_{water}/$kg_{dry\ air}$)

W_1 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องผสมอากาศ (kg_{water}/$kg_{dry\ air}$)

W_{RC} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศเวียนกลับ (kg_{water}/$kg_{dry\ air}$)

RC คือ อัตราการเวียนอากาศกลับ

- ปริมาตรควบคุม 2 (CV2) ปริมาตรควบคุมของถังอบแห้ง



รูปที่ 3.27 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลภายในถังอบแห้ง

สมดุลพลังงาน จากรูปที่ 3.27 ปริมาตรควบคุม 2 (CV2) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศบวกกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในวัสดุอบแห้งเท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างเครื่องอบแห้งและสิ่งแวดล้อมสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$Q_2 - Q_3 = Q_{evap.} + Q_{l,D} \tag{3-9}$$

$$Q_{evap.} + Q_{l,D} = [\dot{m}_a(W_2h_{fg}+T_3(C_a+W_2C_v))] - [\dot{m}_a(W_3h_{fg}+T_4(C_a+W_3C_v))] \quad (3\text{-}10)$$

เมื่อ Q_2 คือ ความร้อนที่เข้าระบบ (kW)

Q_3 คือ ความร้อนที่ออกจากระบบอบแห้ง (kW)

$Q_{evap.}$ คือ ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงภายในวัสดุอบแห้ง (kW)

$Q_{l,D}$ คือ ความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (kW)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งก่อนอบแห้ง (kg_{dryair}/s)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (kJ/kg_{dryair} °C)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg_{water} °C)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ (kJ/kg_{water})

W_3 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

W_2 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนการอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

T_4 คือ อุณหภูมิหลังการอบแห้ง (°C)

T_3 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าระบบอบแห้ง (°C)

สมดุลมวล จากรูปที่ 3.27 ปริมาตรควบคุม 2 (CV2) ปริมาณอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นอากาศเท่ากับอัตราการระเหยน้ำจากกากมันสำปะหลังสามารถหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้งได้ดังสมการ (3-12)

$$\dot{m}_{in}\Delta t(W_3-W_2) = m_{CP}(M_{in}-M_{out}) \quad (3\text{-}11)$$

$$W_3 = \left(\frac{m_{CP}}{\dot{m}_{in}\Delta t}\right)(M_{in}-M_{out})+W_2 \quad (3\text{-}12)$$

เมื่อ W_2 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

W_3 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการอบแห้ง ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

M_{in} คือ ความชื้นของกากมันสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องอบ (% db)

M_{out} คือ ความชื้นของกากมันสำปะหลังหลังออกจากเครื่องอบ (% db)

m_{CP} คือ มวลกากมันสำปะหลังแห้ง ($kg_{dry\ solid}$)

$\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งก่อนอบแห้ง (kg_{dryair}/s)

Δt คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการนำผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง คือ กากมันสำปะหลัง มาศึกษาและออกแบบวิธีการลดความชื้นโดยอาศัยหลักการทางความร้อน(อบแห้งแบบตะแกรงหมุน) เพื่อลดเวลาและพื้นที่ในการลดความชื้นจากวิธีปกติ(การตากบนลานปูน)

การศึกษาการลดความชื้นกากมันสำปะหลัง จะประกอบด้วยการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง และ การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

- ค่าปริมาณค่าความร้อนของกากมันสำปะหลัง(HHV) เป็นค่าปริมาณความร้อนของกากมันสำปะหลังที่ได้จากการอบแห้งแบบตะแกรงหมุนมาเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่าความร้อนคือ 14,901 kJ/kg (HHV)

- ค่าความชื้น จากการนำกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมาหาค่าความชื้น พบว่าค่าความชื้นเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 372.53 % d.b. (78.83 % w.b.) และได้นำกากมันสำปะหลังไปลดความชื้นทางกล (เอ็กซ์ทรูชั่น) พบว่าความชื้นลดลงเหลือ 216.11 % d.b. (68.50 % w.b.) ดังแสดงใน ตารางที่ 4.1 ค่าความชื้นกากมันสำปะหลังสดจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง และ ตารางที่ 4.2 ค่าความชื้นกากมันสำปะหลังไปลดความชื้นทางกล (เอ็กซ์ทรูชั่น)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่าความชื้นเปียกของกากมันสำปะหลังสด

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ(g)	น้ำหนักหลังอบ(g)	% d.b.	% w.b.
1	20.04	4.21	376.01	78.99
2	20.06	4.32	364.35	78.46
3	20.03	4.23	373.52	78.88
เฉลี่ย			371.29	78.78

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังผ่านการลดความชื้นทางกล

ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ(g)	น้ำหนักหลังอบ(g)	% d.b.	% w.b.
1	5.00	1.45	244.83	71.00
2	5.00	1.5	233.33	70.00
3	5.02	1.54	225.97	69.32
เฉลี่ย			234.71	70.11

- ค่าความหนาแน่น ผลการวัดและคำนวณความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังพบว่ากากมันสำปะหลังสดมีความหนาแน่น เฉลี่ยเท่ากับ 712.50 kg/m^3 ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3 ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการลดความชื้นทางกล (เอ็กซ์ทรูชั่น) คือ571.45 kg/m^3 (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังสด

ตัวอย่าง	ปริมาตรถ้วย (m^3)	น้ำหนักกากมัน(g)	ความหนาแน่น(kg/m^3)
1	0.0003082	211.89	687.51
2	0.0003082	227.30	737.51
3	0.0003082	219.59	712.49
เฉลี่ย	0.0003082	219.59	712.50

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังผ่านการลดความชื้นทางกล

ตัวอย่าง	ปริมาตรถ้วย (m^3)	น้ำหนักกากมัน(g)	ความหนาแน่น(kg/m^3)
1	0.0003082	174.40	565.87
2	0.0003082	183.10	594.09
3	0.0003082	170.86	554.38
เฉลี่ย	0.0003082	176.12	571.45

- ลักษณะปรากฏของกากมันสำปะหลัง ลักษณะของกากมันสำปะหลังเมื่อออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ คือมีความหมาด ร่วน แตกตัวง่ายขึ้น และไม่จับตัวเป็นก้อน ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะแตกต่างจากกากมันสำปะหลังสด รูปที่ 4.1 ที่มีลักษณะชื้นมากและจับตัวกันเป็นก้อน จากลักษณะ

ปรากฏของกากมันสำปะหลังอัดรีดจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่ากากมันสำปะหลังอัดรีดจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เหมาะที่จะนำมาลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่

รูปที่ 4.1 กากมันสำปะหลังสด

รูปที่ 4.2 กากมันสำปะหลังอัดรีดจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

4.2 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนได้ทำการทดสอบ 2 รอบ คือ 1) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งโดยใช้สภาวะในการศึกษาคือ อุณหภูมิในการอบแห้งและ ความเร็วรอบในการหมุน 2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งโดยใช้สภาวะในการศึกษาคือปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ

เนื่องจากในขณะที่กากมันสำปะหลังอยู่ในเครื่องอบแห้ง กากมันสำปะหลังจะถูกโรยให้สัมผัสกับลมร้อนด้วยครีบโรยดังนั้นกากมันสำปะหลัง จึงสามารถสัมผัสกับลมร้อนได้ทั่วถึงและภายในเครื่องอบแห้งมีการเดินท่ออากาศร้อนซึ่งได้รับความร้อนจากการเผาไหม้แก๊ส เมื่อกากมันสำปะหลังตกสัมผัสกับท่ออากาศร้อนก็จะได้รับความร้อนจากการนำความร้อนด้วยอีกทางหนึ่งทำให้ความชื้น

ในกากมันสำปะหลังระเหยได้เร็วขึ้น และด้วยถังอบทรงกระบอกทำด้วยตะแกรงจึงทำให้เกิดการระบายอากาศชื้นได้ดี จากลักษณะกากมันสำปะหลังที่ผ่านการการลดความชื้นด้วยเอกซ์ทรูชั่นมีบางส่วนที่เป็นผงทำให้ผงเหล่านั้นร่วงผ่านจากรูตะแกรงได้ โดยกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรงจะมีลักษณะเป็นผงดัง รูปที่ 4.3 ซึ่งมีความชื้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่อยู่ภายในตะแกรงขณะที่กากมันสำปะหลังบางส่วนยังคงค้างภายในถังตะแกรงทรงกระบอกซึ่งมีลักษณะดัง รูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกากมันสำปะหลังที่จับตัวเป็นก้อนก่อนร่วงผ่านตะแกรงซึ่งลักษณะของก้อนจะมีขนาดเล็กโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 5 mm

รูปที่ 4.3 กากมันสำปะหลังส่วนที่ผ่านตะแกรง

รูปที่ 4.4 กากมันสำปะหลังส่วนที่ยังคงค้างภายในถัง

4.2.1 การศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งและ ความเร็วรอบในการหมุน ที่เหมาะสมในการอบแห้ง

ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งซึ่งสภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิในการอบแห้ง (100ºC, 120ºC) และความเร็วรอบในการหมุน (2 RPM, 4RPM, 6RPM) ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งจะวิเคราะห์จาก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (Specific Energy Consumption, SEC) และ ระยะเวลาในการอบแห้ง พบว่า สภาวะการอบแห้งที่ 6 RPM และอุณหภูมิลมร้อน 100 ºC มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำน้อยกว่าที่สภาวะอื่น คือ 5.33 MJ/kg-water และ ใช้เวลาในการอบแห้ง 1.5 ชั่วโมง โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ทดลองที่น้ำหนักป้อนกากมันสำปะหลังที่เท่ากันคือ 40 kg

ตารางที่ 4.5 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบต่างๆ(อุณหภูมิลมร้อน 100 °C)

รายการ	อุณหภูมิลมร้อน 100 °C		
	2 RPM	4 RPM	6 RPM
น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบ (kg)	40	40	40
ความชื้นก่อนอบ (% d.b.)	254.61	246.02	247.22
มวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง($kg_{dry\ solid}$)	4.15	3.36	5.55
มวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง($kg_{dry\ solid}$)	7.14	8.20	5.97
* ความชื้นกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง (% d.b.)	131.56	87.49	110.97
* ความชื้นกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง (% d.b.)	16.28	14.68	13.90
น้ำหนักน้ำระเหย (kg)	22.10	24.30	21.50
ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง(kg)	2.90	2.80	2.10
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	145.64	140.62	105.46
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(kW)	2.10	2.00	1.50
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	18.90	14.40	8.10
พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ(MJ/kg-water)	7.77	6.70	5.65
ระยะเวลาในการอบแห้ง(hr)	2.5	2.0	1.5
อัตราการอบแห้ง($kg_{dry\ solid}$/hr)	4.52	5.78	7.68

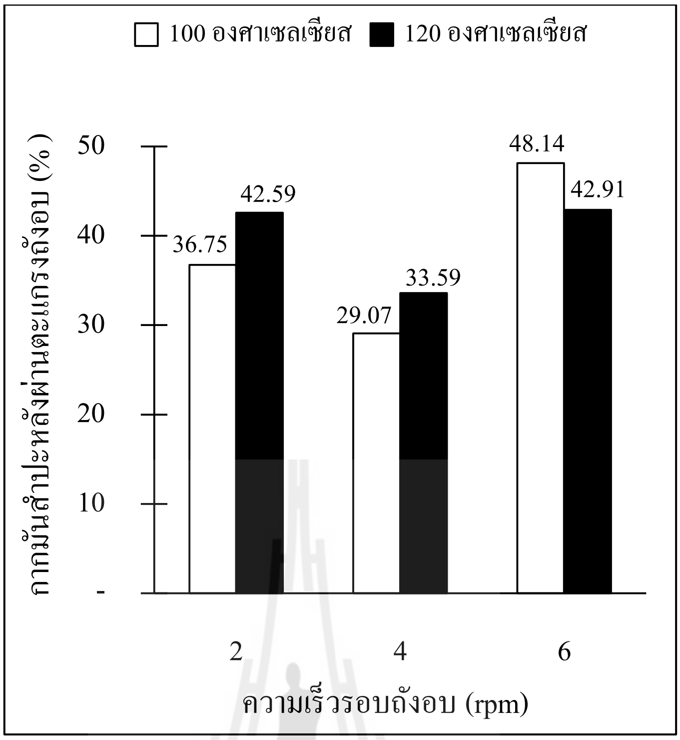
* ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4.6 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบต่างๆ(อุณหภูมิลมร้อน 120 °C)

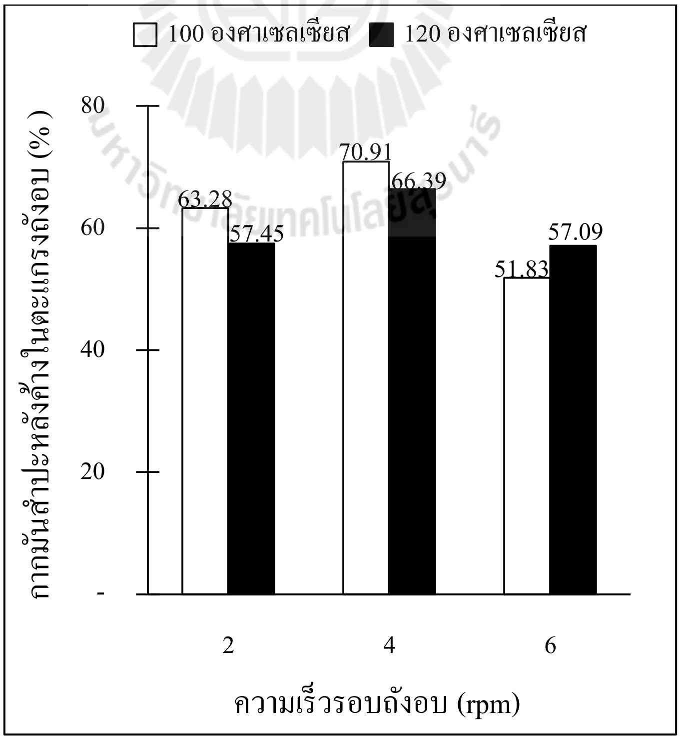
รายการ	อุณหภูมิลมร้อน 120 °C		
	2 RPM	4 RPM	6 RPM
น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบ (kg)	40	40	40
ความชื้นก่อนอบ (% d.b.)	252.11	248.43	243.64
มวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง($kg_{dry\ solid}$)	4.84	3.86	5.00
มวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง($kg_{dry\ solid}$)	6.53	7.62	6.65
* ความชื้นกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง (% d.b.)	88.10	73.76	96.20
* ความชื้นกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง (% d.b.)	11. 86	6.27	11.36
น้ำหนักน้ำระเหย (kg)	23.60	25.20	22.80
ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง(kg)	3.40	3.10	2.40
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	170.75	155.68	120.53
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(kW)	2.10	2.10	1.50
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	18.90	15.12	8.10
พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ(MJ/kg-water)	8.36	7.10	5.96
ระยะเวลาในการอบแห้ง(hr)	2.5	2.0	1.5
อัตราการอบแห้ง($kg_{dry\ solid}$/hr)	4.55	5.74	7.77

* ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

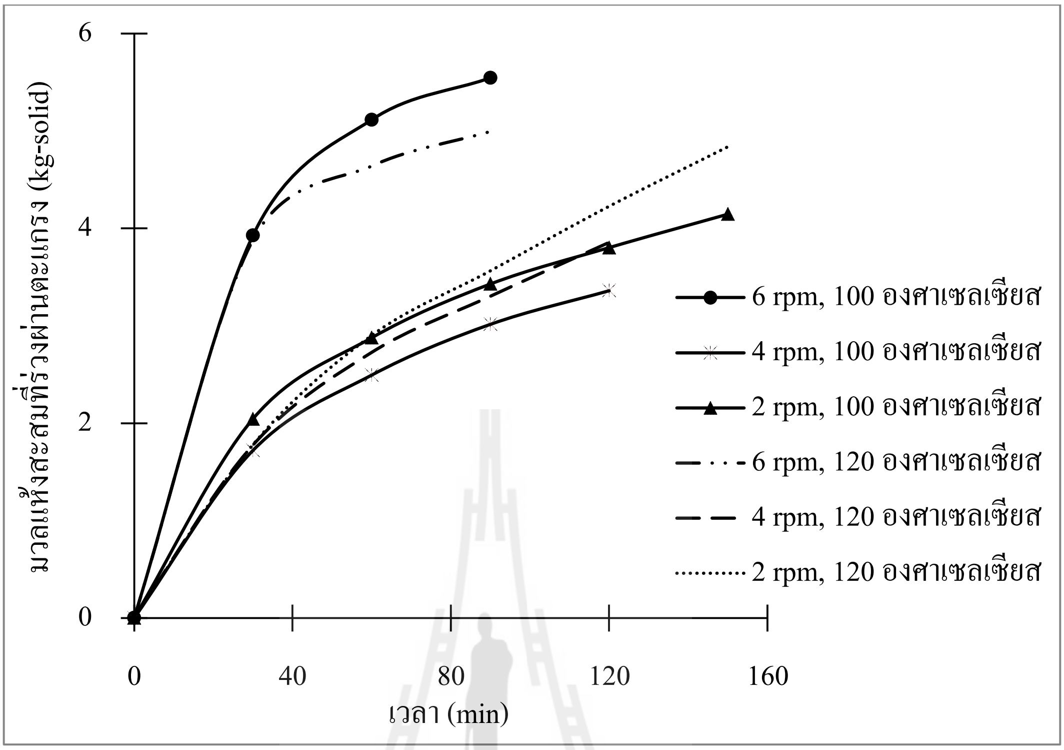
จากตารางผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์สภาวะในการอบแห้งกากมันสำปะหลังได้โดยจะเห็นว่าปัจจัยทางความร้อนและความเร็วรอบถังอบมีส่วนทำให้เส้นใยของกากมันสำปะหลังลอดผ่านรูตะแกรง ดังสังเกตได้จาก รูปที่ 4.5 เมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงอัตราการร่วงจะสูงกว่าอุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำกว่า ซึ่งกากมันสำปะหลังเหล่านี้จะมีเวลาสัมผัสกับลมร้อนได้น้อยทำให้ยังคงมีความชื้นที่สูงทำให้ต้องนำกลับมาลดความชื้นอีกครั้ง แต่ในขณะที่กากมันสำปะหลังที่ค้างในถังอบสามารถที่จะนำไปเก็บรักษาได้ซึ่งความชื้นที่คงเหลือจะต่ำกว่าความชื้นจัดเก็บโดยอัตราส่วนมวลคงค้างก็แปรผกผันกับเส้นใยของกากมันที่ลอดผ่านรูตะแกรง รูปที่ 4.6



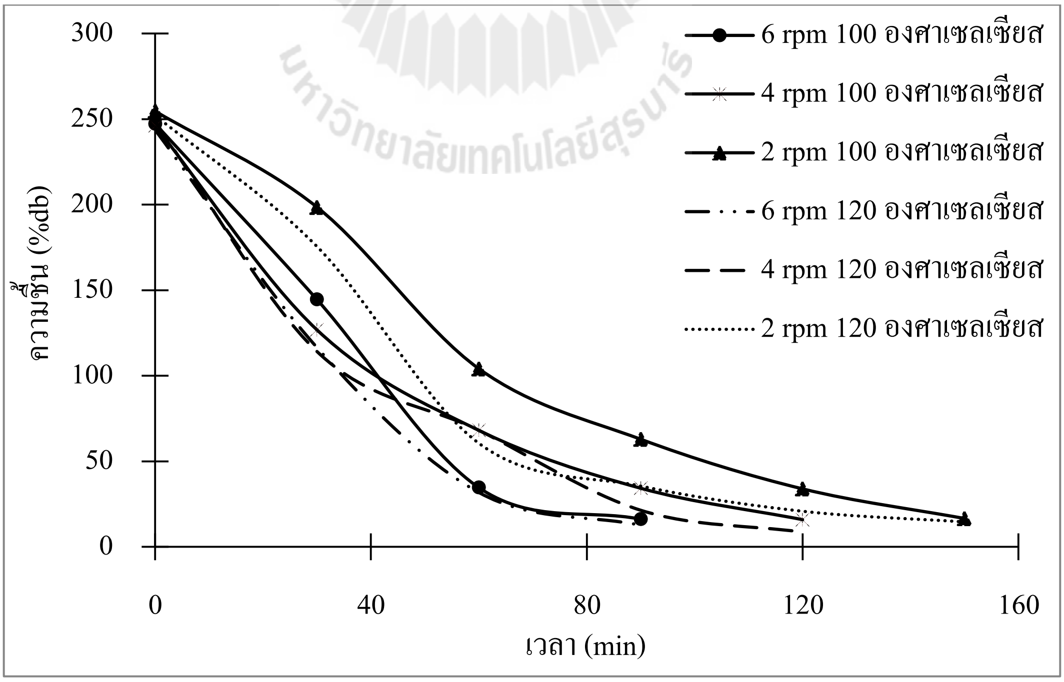
รูปที่ 4.5 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด



รูปที่ 4.6 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด

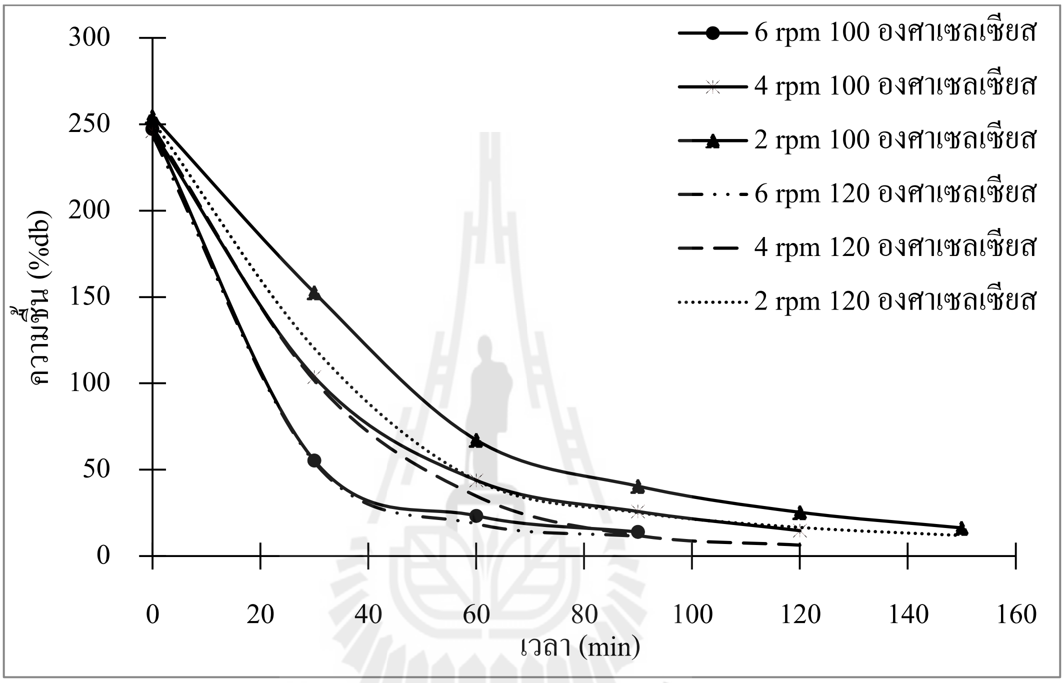


รูปที่ 4.7 น้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง(มวลแห้ง)



รูปที่ 4.8 ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ

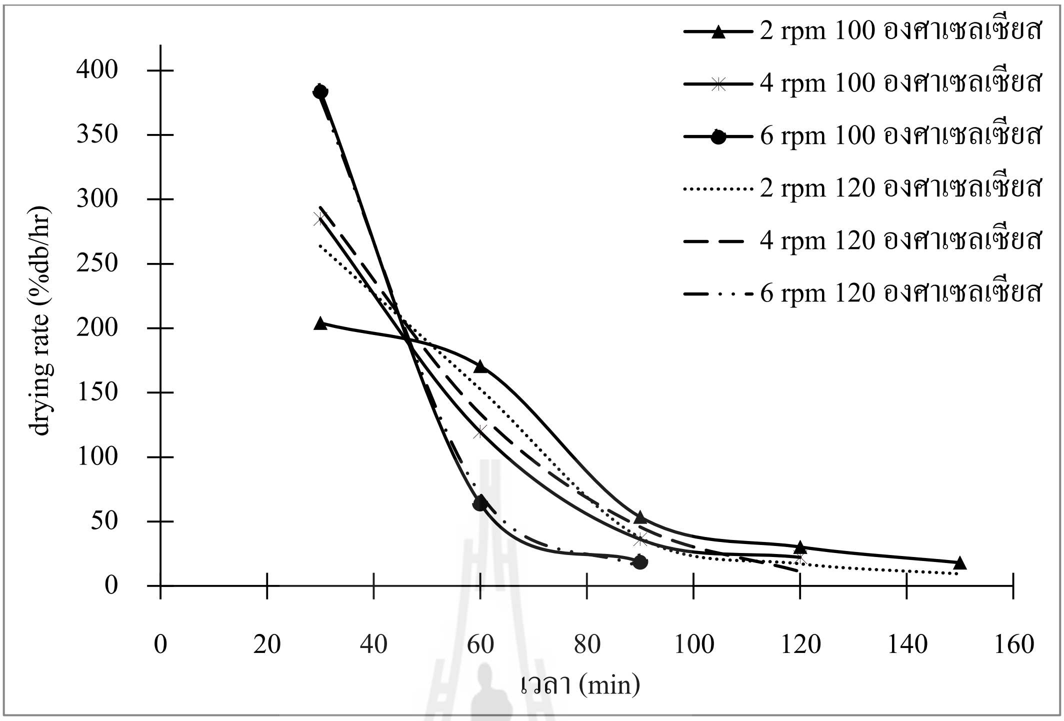
จาก รูปที่ 4.7 แสดงน้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง (มวลแห้ง) จะเห็นว่าช่วงแรกในการอบแห้งกากมันสำปะหลังจะร่วงผ่านตะแกรงสูงและจะค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากกากมันสำปะหลังเริ่มเกาะตัวกัน โดยความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงช่วงแรกจะมีความชื้นสูงและความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงจะค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นดัง รูปที่ 4.8



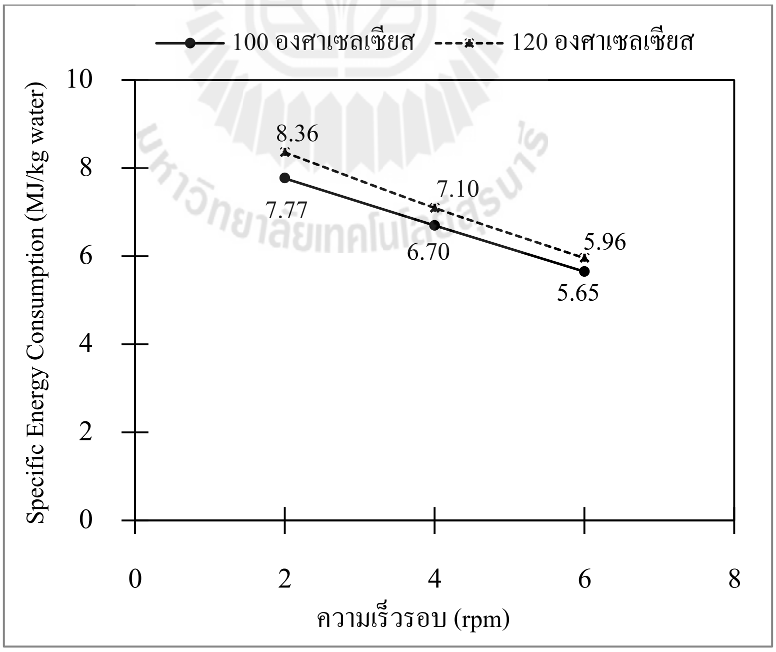
รูปที่ 4.9 ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าความเร็วรอบมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งเนื่องจากในขณะที่กากมันสำปะหลังอยู่ในเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังจะถูกโรยให้สัมผัสกับลมร้อนด้วยครีบโรยดังนั้นความเร็วรอบถังอบที่สูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ

รูปที่ 4.10 อัตราการอบแห้งจะแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period of drying) จะเห็นว่าช่วงการอบแห้งคงที่ ความเร็วรอบ 6 rpm จะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าที่สภาวะความเร็วรอบอื่นๆ ช่วงที่สองคือช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เนื่องจากความชื้นกากมันสำปะหลังเริ่มลดลงทำให้ปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) จะเห็นว่าระยะเวลาที่จะเกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลงแต่ละสภาวะมีความแตกต่างกันในสภาวะที่ความเร็วรอบถังอบ 6 rpm ใช้ระยะเวลาในการเกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลงน้อยกว่าสภาวะอื่น



รูปที่ 4.10 อัตราการอบแห้งกากมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.11 พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าความเร็วรอบของการหมุนถังอบ(ถังตะแกรงทรงกระบอก)และอุณหภูมิลมร้อนมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำโดยที่ ความเร็วรอบเดียวกัน อุณหภูมิลมร้อนที่สูงกว่าจะใช้พลังงานในการระเหยน้ำที่สูงกว่าเนื่องจากที่กล่าวไว้แล้วคือ เมื่อถังอบหมุนกากมันสำปะหลังที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้งกากมันสำปะหลังจะถูกโรยให้สัมผัสกับลมร้อนด้วยครีบโรย เมื่อถังอบมีความเร็วรอบที่สูงกว่าก็จะมีโอกาสในการสัมผัสกับลมร้อนได้มากกว่าการระเหยน้ำก็จะสูงกว่าด้วย ดังนั้นเมื่อความเร็วรอบของการหมุนถังอบ (ถังตะแกรงทรงกระบอก) ที่เหมาะสมให้อุณหภูมิลมร้อนที่เหมาะสมค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการระเหยน้ำจะน้อยนั่นก็คือการใช้พลังงานในการอบแห้งที่น้อยและเหมาะสมกว่าสภาวะอื่นๆ ด้วย

4.2.2 การศึกษาปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังตะแกรงทรงกระบอกที่เหมาะสมในการอบแห้ง

จากสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ อุณหภูมิในการอบแห้ง 100ºC และความเร็วรอบในการหมุน 6 RPM จึงนำสภาวะที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งจากความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (Specific Energy Consumption, SEC) และ ระยะเวลาในการอบแห้ง อีกครั้งโดยการศึกษาว่าปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังตะแกรงทรงกระบอกควรจะมีปริมาณเท่าใดจึงจะทำให้ใช้พลังงานและเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้น้ำหนักป้อน 20 kg (7% ของปริมาตรถังอบ) 40 kg (14% ของปริมาตรถังอบ) 60 kg (21% ของปริมาตรถังอบ) พบว่าที่ปริมาตร 14% ของปริมาตรถังอบ หรือ คิดเป็นน้ำหนักคือ 40 kg จะใช้เวลาในการอบแห้งคือ 1.5 ชั่วโมง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำคือ 5.62 MJ/kg-water ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้พลังงานน้อยกว่าที่สภาวะอื่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.7 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่น้ำหนักป้อนต่างๆ(อุณหภูมิลมร้อน 100 °C)

รายการ	อุณหภูมิลมร้อน 100 °C		
	20 kg	40 kg	60 kg
น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบ (kg)	20	40	60
ความชื้นก่อนอบ (% d.b.)	257.14	240.14	233.33
มวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง ($kg_{dry\ solid}$)	3.42	6.61	6.42
มวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง ($kg_{dry\ solid}$)	2.18	5.15	11.58
* ความชื้นกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง (% d.b.)	98.57	107.21	115.04
* ความชื้นกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง (% d.b.)	6.50	14.55	15.74

ตารางที่ 4.7 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่น้ำหนักป้อนต่างๆ(อุณหภูมิลมร้อน 100 °C) (ต่อ)

รายการ	อุณหภูมิลมร้อน 100 °C		
	20 kg	40 kg	60 kg
น้ำหนักน้ำระเหย (kg)	10.88	20.40	32.80
ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง (kg)	1.50	2.10	4.60
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	75.33	105.46	231.01
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kW)	1.70	1.70	3.40
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	9.18	9.18	36.72
พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (MJ/kg-water)	8.09	5.94	8.48
ระยะเวลาในการอบแห้ง(hr)	1.5	1.5	3.0
อัตราการอบแห้ง($kg_{dry\ solid}$/hr)	3.73	7.84	6.00

* ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4.8 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่น้ำหนักป้อนต่างๆ(อุณหภูมิลมร้อน 120 °C)

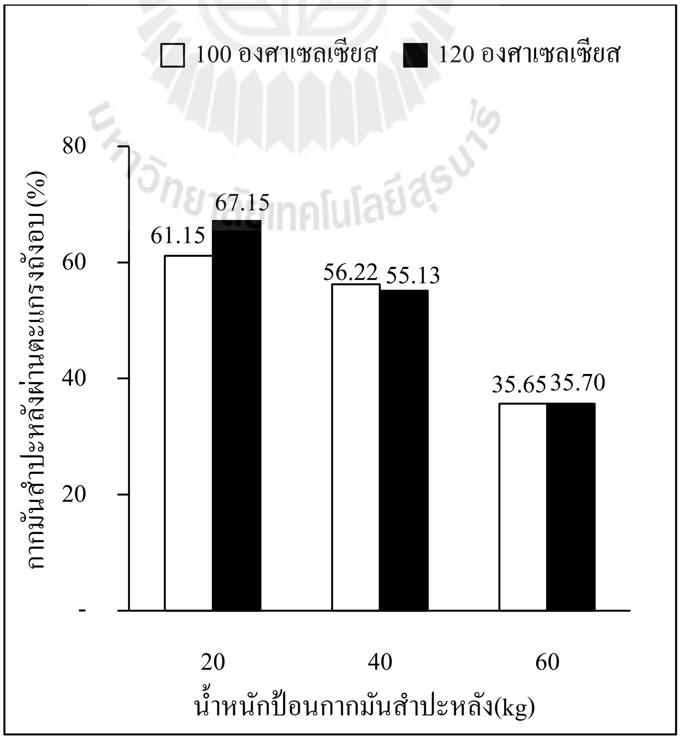
รายการ	อุณหภูมิลมร้อน 120 °C		
	20 kg	40 kg	60 kg
น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนอบ (kg)	20	40	60
ความชื้นก่อนอบ (% d.b.)	220.51	206.75	231.13
มวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง($kg_{dry\ solid}$)	4.19	7.19	6.47
มวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง($kg_{dry\ solid}$)	2.05	5.85	11.66
* ความชื้นกากมันสำปะหลังผ่านตะแกรง (% d.b.)	72.07	86.16	121.07
* ความชื้นกากมันสำปะหลังค้างตะแกรง (% d.b.)	2.56	5.37	8.11
น้ำหนักน้ำระเหย (kg)	10.69	20.44	33.10
ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการอบแห้ง (kg)	2.60	3.00	4.90
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	130.57	150.66	246.08
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kW)	1.80	1.50	3.40
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	9.72	8.10	36.72
พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (MJ/kg -water)	13.44	8.09	8.86

ตารางที่ 4.8 ผลการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่น้ำหนักป้อนต่างๆ(อุณหภูมิลมร้อน 120 °C) (ต่อ)

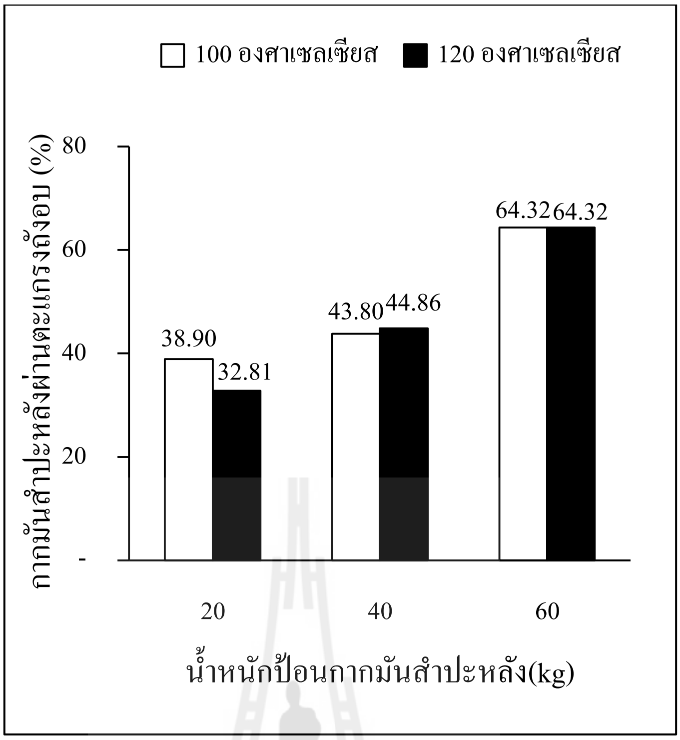
รายการ	อุณหภูมิลมร้อน 100 °C		
	20 kg	40 kg	60 kg
ระยะเวลาในการอบแห้ง (hr)	1.5	1.5	3.0
อัตราการอบแห้ง ($kg_{dry\ solid}$/hr)	4.16	8.69	6.04

* ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

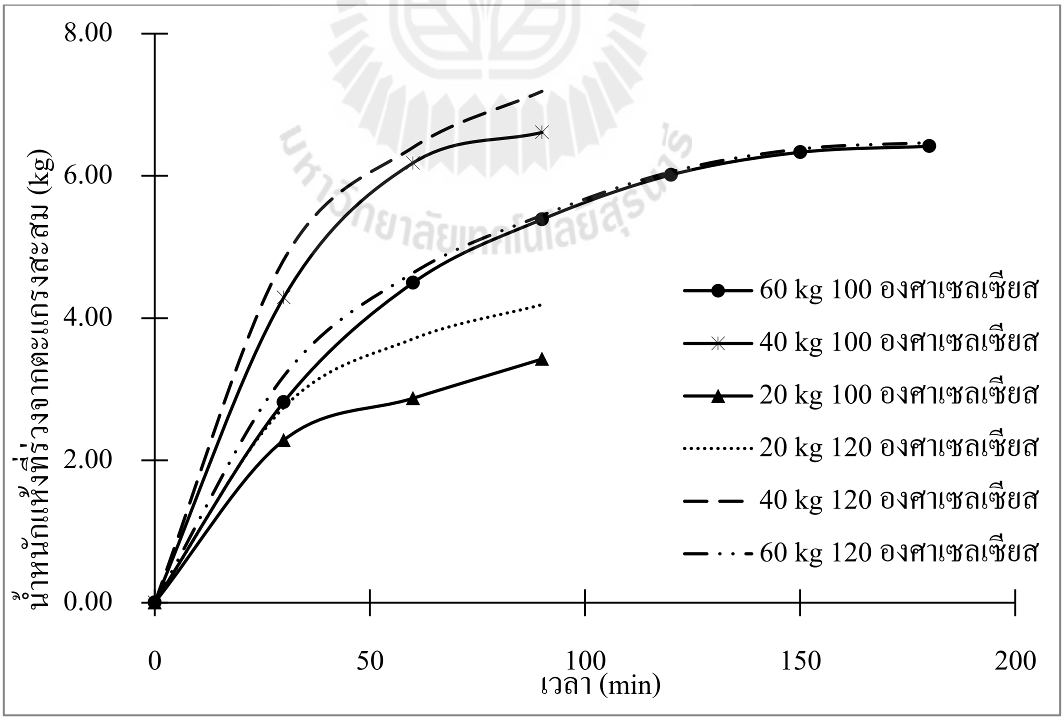
จากตารางผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์สภาวะในการอบแห้งกากมันสำปะหลังได้โดยจะเห็นว่าปัจจัยทางความร้อนและปริมาณการป้อนกากมันสำปะหลังมีส่วนทำให้เส้นใยของกากมันสำปะหลังลอดผ่านรูตะแกรงได้เมื่ออุณหภูมิสูงดังสังเกตุได้จาก รูปที่ 4.12 เมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงอัตราการร่วงจะสูงกว่าอุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำกว่า ซึ่งกากมันสำปะหลังเหล่านี้จะมีเวลาสัมผัสกับลมร้อนได้น้อยทำให้ยังคงมีความชื้นที่สูงทำให้ต้องนำกลับมาลดความชื้นอีกครั้ง แต่ในขณะที่กากมันสำปะหลังที่ค้างในถังอบสามารถที่จะนำไปเก็บรักษาได้ซึ่งความชื้นที่คงเหลือจะต่ำกว่าความชื้นจัดเก็บ โดยอัตราส่วนมวลคงค้างก็แปรผกผันกับเส้นใยของกากมันที่ลอดผ่านรูตะแกรงรูปที่ 4.13



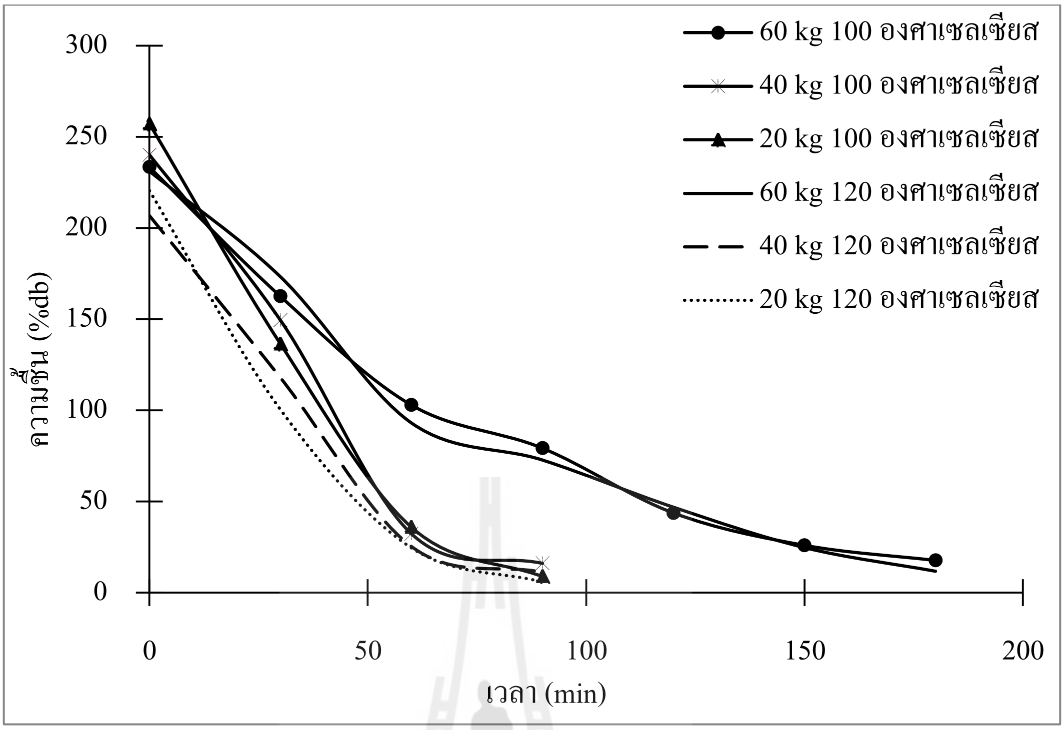
รูปที่ 4.12 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังผ่านรูตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด



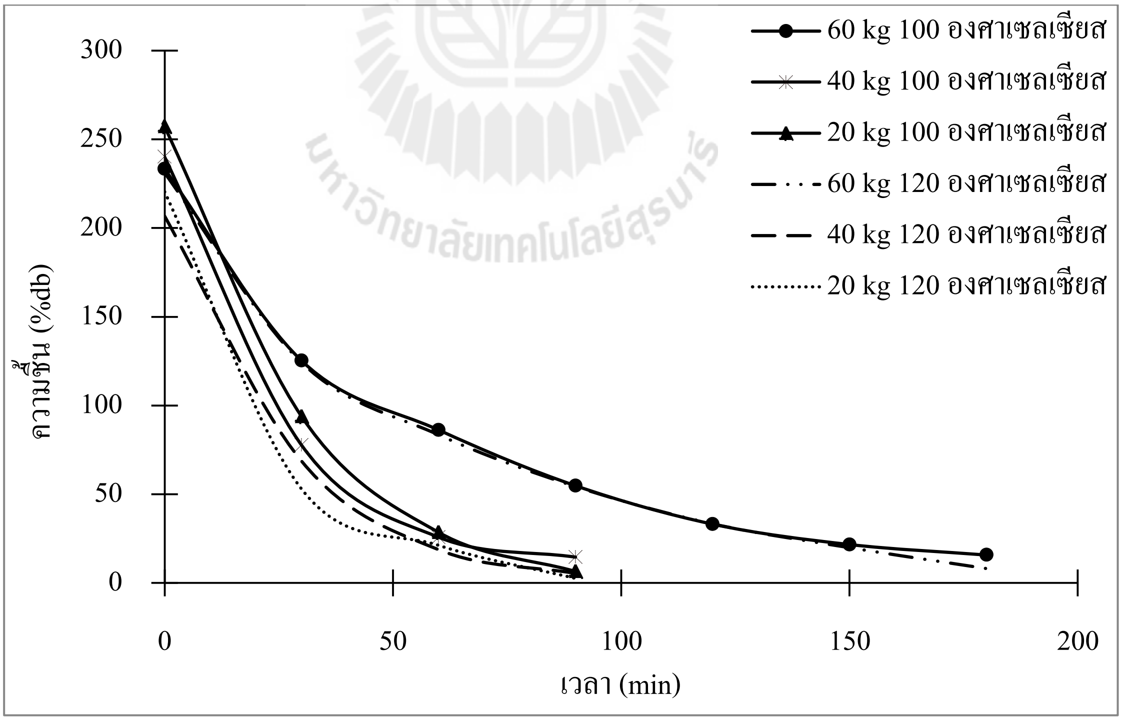
รูปที่ 4.13 สัดส่วนมวลแห้งกากมันสำปะหลังค้างในตะแกรงถังอบเทียบกับมวลแห้งทั้งหมด



รูปที่ 4.14 น้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง(มวลแห้ง)

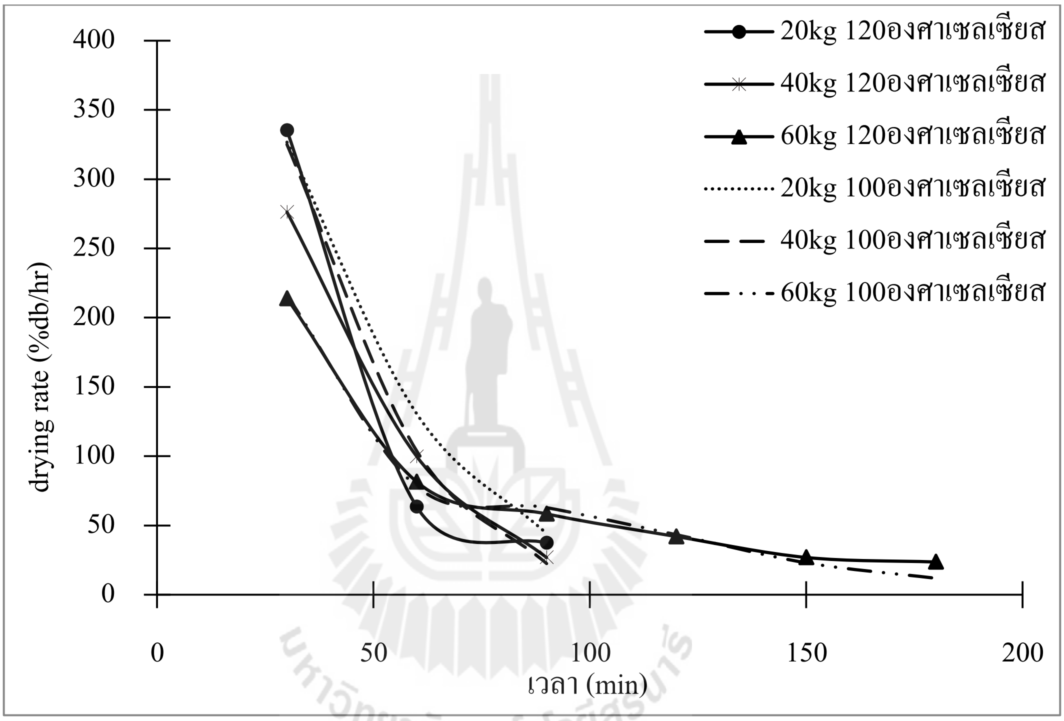


รูปที่ 4.15 ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.16 ระยะเวลาในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

จาก รูปที่ 4.14 แสดงน้ำหนักสะสมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง(มวลแห้ง)จะเห็นว่าช่วงแรกในการอบแห้งกากมันสำปะหลังจะร่วงผ่านตะแกรงสูงและค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากกากมันสำปะหลังเริ่มเกาะตัวกัน น้ำหนักแห้งสะสมของน้ำหนักป้อน 60 kg และ 40 kg มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 6.5 kg โดยความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงช่วงแรกจะมีความชื้นสูงและความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงจะค่อยๆลดลงเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นดัง รูปที่ 4.15

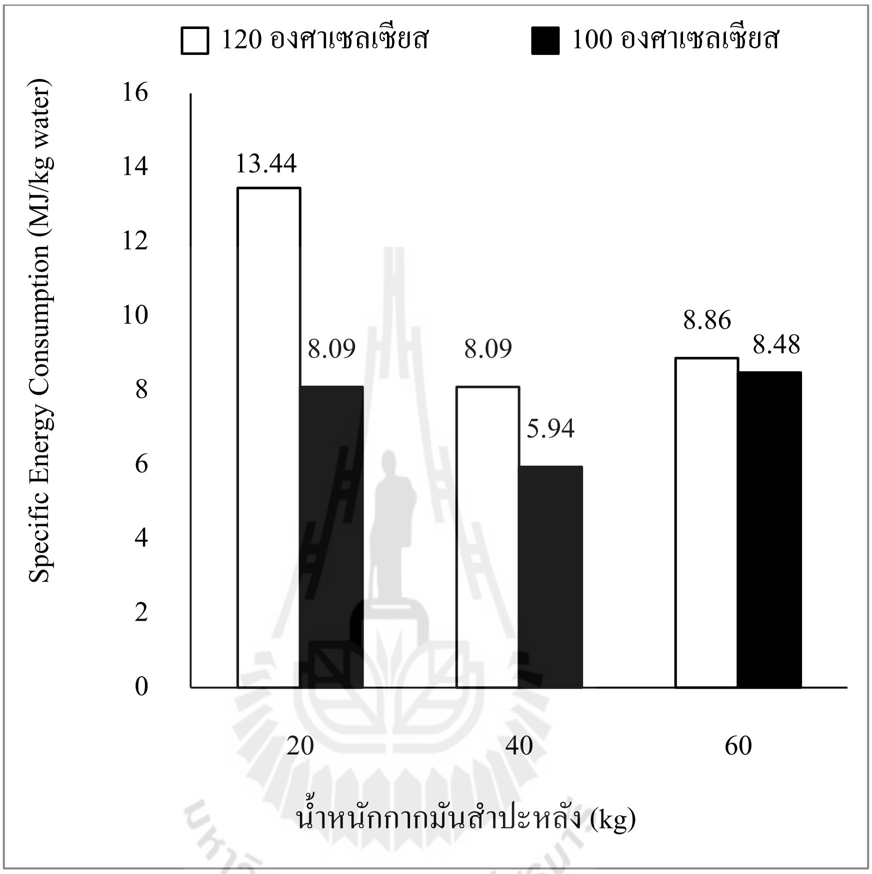


รูปที่ 4.17 อัตราการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

จาก รูปที่ 4.16 จะเห็นว่าน้ำหนักป้อนของกากมันสำปะหลังมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งเนื่องจากเมื่อกากมันสำปะหลังในถังอบสูงการระเหยน้ำก็จะใช้เวลานานเพื่อที่จะลดความชื้นให้ได้ความชื้นที่ต้องการ ที่น้ำหนักป้อน 20 kg และ 40 kg ใช้เวลาในการอบแห้งไม่ต่างกันแต่ที่น้ำหนักป้อน 60 kg จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 3 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระยะเวลานานกว่า น้ำหนักป้อน 20 kg และ 40 kg

จาก รูปที่ 4.17 อัตราการอบแห้งจะแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period of drying) จะเห็นว่าช่วงการอบแห้งคงที่ น้ำหนักป้อน 20 kg และ 40 kg จะมีอัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกันและสูงกว่าที่น้ำหนักป้อน 60 kg ช่วงที่สองคือช่วงอัตราการอบแห้ง

ลดลง (falling rate period) เนื่องจากความชื้นกากมันสำปะหลังเริ่มลดลงทำให้ปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content)



รูปที่ 4.18 พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ

ปริมาณกากมันสำปะหลังในถังอบ(ถังตะแกรงทรงกระบอก)มีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำเมื่อปริมาณกากมันสำปะหลังในถังอบมีปริมาณมากหรือน้อยไปจะใช้พลังงานในการระเหยน้ำสูง จาก รูปที่ 4.18 พบว่าปริมาณกากมันสำปะหลังในถังอบ 40 kg (14% ของปริมาตรถังอบ) ใช้พลังงานในการระเหยน้ำน้อยกว่า 20 kg (7% ของปริมาตรถังอบ) และ 60 kg (21% ของปริมาตรถังอบ)

4.3 สมดุลพลังงานและสมดุลมวลของระบบ

4.3.1 สมดุลพลังงานของระบบ

จากหลักสมดุลพลังงานสามารถคำนวณหาสมดุลพลังงานของระบบลมร้อนได้ดังตารางที่ 4.9 ใช้สภาวะการทดลองที่ ความเร็วรอบถังอบ 6 RPM, ปริมาณกากมันสำปะหลัง 40 kg

ตารางที่ 4.9 สมดุลพลังงานของระบบความร้อน

อุณหภูมิลมร้อน (°C)	เวลา (min)	Q_1	Q_2	$Q_{l,H}$
100	30	19.53	19.00	0.53
	60	19.53	19.12	0.41
	90	19.53	18.99	0.54
120	30	27.90	25.83	2.07
	60	27.90	25.72	2.18
	90	27.90	25.81	2.09

จากหลักสมดุลพลังงานสามารถคำนวณหาสมดุลพลังงานของระบบอบแห้งได้ดังตารางที่ 4.10 ใช้สภาวะการทดลองที่ ความเร็วรอบถังอบ 6 RPM, ปริมาณกากมันสำปะหลัง 40 kg

ตารางที่ 4.10 สมดุลพลังงานภายในถังอบแห้ง

อุณหภูมิลมร้อน (°C)	เวลา (min)	Q_2	$Q_{evap.} + Q_{l,D}$	Q_3
100	30	19.00	14.45	4.55
	60	19.12	13.80	5.32
	90	18.99	11.71	7.28
120	30	25.83	18.10	7.73
	60	25.72	16.01	9.71
	90	25.81	14.02	11.79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3.2 สมดุลมวลของระบบ

จากหลักสมดุลมวลสามารถคำนวณหาสมดุลมวลของระบบลมร้อนได้ดังตารางที่ 4.11 โดยใช้สภาวะการทดลองที่ ความเร็วรอบถังอบ 6 RPM, ปริมาณกากมันสำปะหลัง 40 kg

ตารางที่ 4.11 สมดุลมวลของระบบความร้อน

อุณหภูมิลมร้อน (°C)	เวลา (min)	W_1	W_{RC}	W_2
100	30	0.0101	0	0.0101
	60	0.0105	0.0152	0.0205
	90	0.0105	0.0135	0.0188
120	30	0.0090	0	0.0090
	60	0.0085	0.0140	0.0183
	90	0.0075	0.0126	0.0163

จากหลักสมดุลมวลสามารถคำนวณหาสมดุลมวลของระบบอบแห้งได้ดังตารางที่ 4.12 โดยใช้สภาวะการทดลองที่ ความเร็วรอบถังอบ 6 RPM, ปริมาณกากมันสำปะหลัง 40 kg

ตารางที่ 4.12 สมดุลมวลภายในถังอบแห้ง

อุณหภูมิลมร้อน (°C)	เวลา (min)	W_2	W_3
100	30	0.0101	0.0305
	60	0.0205	0.0270
	90	0.0188	0.0202
120	30	0.0090	0.0280
	60	0.0183	0.0252
	90	0.0163	0.0182

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 คุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังสดที่ออกจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะชื้นมากและจับตัวกันเป็นก้อนโดยมีความชื้นเฉลี่ยคือ 372.53 % มาตรฐานแห้ง (78.83 % มาตรฐานเปียก) และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 712.50 kg/m^3 เมื่อผ่านการลดความชื้นทางกล (เอ็กซ์ทรูชัน) พบว่ากากมันสำปะหลังมีความชื้นลดลงเหลือ 216.11 % มาตรฐานแห้ง (68.50 % มาตรฐานเปียก) และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 571.45 kg/m^3 มีลักษณะทั่วไป คือมีความหมาด ร่วน แตกตัวได้ง่ายขึ้น และไม่จับตัวเป็นก้อน ค่าความร้อนของกากมันสำปะหลังโดยเฉลี่ยคือ 14,901 kJ/kg (HHV)

5.2 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

5.2.1 การศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งและ ความเร็วรอบในการหมุนที่เหมาะสมในการอบแห้ง

อุณหภูมิในการอบแห้ง (100ºC, 120ºC) และความเร็วรอบในการหมุน (2 RPM, 4RPM, 6RPM) ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งจะวิเคราะห์จาก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (Specific Energy Consumption, SEC) และ ระยะเวลาในการอบแห้ง พบว่าที่ความเร็วรอบ 6 RPM และความร้อน 100 ºC มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำน้อยกว่าที่สภาวะอื่น คือ 5.65 MJ/kg-water และ ใช้เวลาในการอบแห้ง 1.5 ชั่วโมง อัตราการอบแห้ง 7.68 $kg_{dry\ solid}/hr$ กากมันสำปะหลังที่ได้มีสองส่วนคือส่วนที่ร่วงผ่านรูตะแกรงของถังอบทรงกระบอก 48.14 % ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 110.97 % d.b. แล ะส่วนที่ค้างภายในตะแกรงของถังอบทรงกระบอก 51.83 % ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 13.90 % d.b.

5.2.2 การศึกษาปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังตะแกรงทรงกระบอกที่เหมาะสมในการอบแห้ง

ใช้น้ำหนักป้อน 20 kg (7% ของปริมาตรถังอบ) 40 kg (14% ของปริมาตรถังอบ) 60 kg (21% ของปริมาตรถังอบ) และ อุณหภูมิในการอบแห้ง (100ºC, 120ºC) ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งจะวิเคราะห์จาก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (Specific

Energy Consumption, SEC) และ ระยะเวลาในการอบแห้ง พบว่าที่ปริมาตร 14% ของปริมาตรถังอบ หรือ คิดเป็นน้ำหนักคือ 40 kg จะใช้เวลาในการอบแห้งคือ 1.5 ชั่วโมง อัตราการอบแห้ง 7.84 $kg_{dry\ solid}/h$ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำคือ 5.94 MJ/kg-water กากมันสำปะหลังที่ได้มีสองส่วนคือส่วนที่ร่วงผ่านรูตะแกรงของถังอบ 56.22 % ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 107.21 % d.b. และส่วนที่ค้างภายในตะแกรงของถังอบ 43.80 % ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 14.55 % d.b. ซึ่งสภาวะการอบแห้งนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ

จากกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงยังคงมีความชื้นสูงอยู่จึงจำเป็นที่จะต้องนำมาลดความชื้นอีกครั้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดอื่น หรือเครื่องอบแห้งเดิมโดยเปลี่ยนจากถังตะแกรงทรงกระบอกเป็นถังอบแบบทรงกระบอกทึบเพื่อไม่ให้กากมันสำปะหลังร่วงอีก

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากที่จะต้องลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงอีกครั้งเพราะยังคงมีความชื้นสูงอยู่จึงควรที่จะปรับปรุงเครื่องอบแห้งให้สามารถอบแห้งกากมันสำปะหลังได้ในครั้งเดียวโดยการทำให้เป็นถังอบแห้งทรงกระบอกสองชั้นโดยชั้นในเป็นตะแกรงและชั้นนอกเป็นถังทรงกระบอกทึบ

5.3.2 การใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงเป็นการใช้เพื่อการศึกษาจึงควรมีวิธีการหาเชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานอื่นๆที่มีราคาที่ถูกกว่า LPG มาใช้ในการอบแห้งเพื่อลดต้นทุนในการอบแห้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2550). อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง. **รายงานสถานภาพการกำจัดและใช้ประโยชน์น้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง**. ศูนย์พันธุวิศวกรรม และเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการพลังงาน, กรุงเทพ ฯ. 13 น

กล้าณรงค์ ศรีรอด (2540). **การใช้ประโยชน์จากกากมันโดยกระบวนการทางชีวภาพ**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ

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

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

ทรงศักดิ์ วัฒนชัยเสรีกุล (2543). **อาหารสัตว์จากกากมันสำปะหลังหมัก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นันทพร ตรีภพนาถ (2554). **การผลิตเยื่อเชิงกลและเชิงเคมีจากกากมันสำปะหลัง**. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาศิลปากรระดับชาติ ครั้งที่ 1. ประจำปีการศึกษา 2554. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

พิพัฒน์ อมตฉายา (2548). **รายงานการวิจัย การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา

ไพบูลย์ โรจน์วิบูลย์ชัย (2535). **การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วีรชัย อาจหาญ และคณะ (2552). **การพัฒนากระบวนผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล**. ภาคีศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน และคณะ (2556). **การศึกษาต้นแบบการผลิตกากมันสำปะหลังแห้งสำหรับผลิตเอทานอลโดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชั่น**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุระ ตันดี (2553). **คุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง**. โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม ครั้งที่ 1 ประจำปีการศึกษา 2553. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (2537) เรียวโซ โทเอ. **อุปกรณ์อบแห้งในอุตสาหกรรม**. แปลโดยวิวัฒน์ ตัณฑะ พานิชกุล. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์

สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย (2550). **มันสำปะหลัง**. แหล่งที่มา: http://www.tapiocathai.org/ttsa/aboutus/aboutus2.htm, 11 พฤศจิกายน 2550.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (2540). **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สมบัติ ขอวิวัฒนา (2529). **กรรมวิธีการอบแห้ง**. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 284 น.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2551). **สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2549**: ตารางที่ 24 มันสำปะหลัง: เนื้อที่ ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายจังหวัด ปี 2548-2550. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2551, จาก http://www.oae.go.th/statistic/yearbook49/section1/sec1table24.pdf

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2552). **ข้อมูลราคามันสำปะหลังสด**. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2552 ,จาก http://www.oae.go.th/oae_report/price/price_by_day_result.php.

Brennan, J.G., J.R. Butters, N.D. Cowell and A.E.V. Lilley. 1990. **Food Engineering Operations**. Elsevier Science Publishing, New York. 700 p.

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.

Pandey, A., C. R. Soccol, P. Nigam, V. T. Soccol, L. P. S. vanderberghe and R. Mohan. 2000. **Biotechnological potential of agro-industrial residues**. II: cassava bagasse. *Bioresource Tech.* 74: 81-87

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

Sriroth, K., R. Chollakup, S. Chotneeranat, K. Piyachomkwan and C. G. Oates. (2000). **Processing of cassava waste for improved biomass utilization**. Bioresource Tech. 71: 63-69.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ก1 การหาคุณสมบัติทางความร้อนของกากมันสำปะหลัง

ก1.1 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM E711 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียดชั่งน้ำหนัก 0.1-0.2 กรัม ใส่ลงในถ้วยตัวอย่างพันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) วางในเครื่องบอมบ์ปิดฝาอัดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน 30 kg/cm^3 ประมาณ 5 นาที แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เติมน้ำประมาณ 1800 mlกดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่างอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนคงที่ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้ กับน้ำแล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง

ค่าทางความร้อนทางเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิงเนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจนแล้วผลของการสันดาปจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ(ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ)ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมาค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุดแต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัวค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำการหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปทำการชั่งน้ำหนักให้ละเอียดแล้วนำมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์

ก2 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

ก2.1 ความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังจะอยู่ในรูปของความหนาแน่นปรากฏ(bulk density) หาได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของกากมันสำปะหลัง ใส่กากมันสำปะหลังในภาชนะทรงกระบอกให้เต็มไม่ให้เหลือช่องว่างภายในภาชนะนำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณค่าความหนาแน่นตาม สมการที่ (ก1)

$$\text{Density}=\frac{\text{Mass(kg)}}{\text{Volume}(\text{m}^3)} \qquad (\text{ก}1)$$

ก2.2 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลังโดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก(Wet Basis) หรือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลังแห้งเป็นมาตรฐานแห้ง(Dry Basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. อบถาดอลูมิเนียมในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105ºC เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสสิเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

2. ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ลงในถาดอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักจากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3. นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105ºC เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

4. นำถาดอลูมิเนียมเข้าเดสสิเคเตอร์ (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในทำการบันทึกผลจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณ

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงของน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (ก2)

$$M_{wb}=\frac{W_1-W_2}{W_1}\times 100 \qquad (ก2)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจาก dry matter ของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ความชื้นมาตรฐานแห้งสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (ก3)

$$M_{db}=\frac{W_1-W_2}{W_2}\times 100 \qquad (ก3)$$

เมื่อ M_{wb} คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis)

M_{db} คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis)

W_1 คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

ก3 การประมวลผลการทดลอง

ก3.1 ปริมาณน้ำที่ระเหยในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

คือปริมาณของนำภายในกากมันที่ระเหยออกมาระหว่างการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการโดยมีหน่วยเป็น (kg) สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (ก4)

$$W_w = \frac{W_d \times M_{db}}{100} \quad \text{(ก4)}$$

$$W_{w,t} = W_{in} + \sum_{i=0}^{n} W_{w,i} \quad \text{(ก5)}$$

$$W_{loss} = W_{w,1} - W_{w,t} \quad \text{(ก6)}$$

เมื่อ M_{db} คือ ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)

W_d คือ น้ำหนักกากมันสำปะหลังมวลแห้ง (kg)

W_w คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุ (kg)

$W_{w,t}$ คือ น้ำหนักรวมของน้ำในวัสดุ (kg)

W_{in} คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุภายในถังอบ (kg)

$W_{w,i}$ คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ (kg)

W_{loss} คือ น้ำหนักน้ำที่ระเหยทั้งหมดในการอบแห้ง (kg)

$W_{w,1}$ คือ น้ำหนักน้ำในวัสดุก่อนเข้าเครื่องอบ (kg)

ก3.2 สัดส่วนคงค้างภายในถังอบตะแกรงทรงกระบอก

คือสัดส่วนของผลรวมน้ำหนักกากมันสำปะหลัง (มวลแห้ง) ที่ค้างภายในถังอบตะแกรงทรงกระบอกขณะอบแห้งต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง (มวลแห้ง) ทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (ก7)

$$\%_r = \frac{\sum_{i=0}^{n} W_{r,i}}{W_a} \times 100 \quad \text{(ก7)}$$

เมื่อ $\%_r$ คือ สัดส่วนคงค้างภายในถังอบตะแกรงทรงกระบอก (%)

W_a คือ น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการอบแห้ง ($kg_{dry\ solid}$)

$W_{r,i}$ คือ น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ค้างภายในถังอบช่วงเวลาต่างๆ ($kg_{dry\ solid}$)

ก3.3 สัดส่วนการร่อนผ่านตะแกรง

คือสัดส่วนของผลรวมน้ำหนักกากมันสำปะหลัง (มวลแห้ง) ที่ร่วงผ่านรูตะแกรงขณะอบแห้งต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง (มวลแห้ง) ทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ก8)

$$\%_f = \frac{\sum_{i=0}^{n} W_{f,i}}{W_a} \times 100 \qquad (ก8)$$

เมื่อ $\%_f$ คือ สัดส่วนการร่อนผ่านตะแกรง (%)

W_a คือ น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการอบแห้ง ($kg_{dry\ solid}$)

$W_{f,i}$ คือ น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงช่วงเวลาต่างๆ ($kg_{dry\ solid}$)

ก3.4 มวลแห้งสะสมที่ร่วงผ่านตะแกรง

คือผลรวมของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (ก9)

$$W_{f,a} = \sum_{i=0}^{n} W_{f,i} \qquad (ก9)$$

เมื่อ $W_{f,a}$ คือ มวลแห้งสะสมที่ร่วงผ่านตะแกรง ($kg_{dry\ solid}$)

$W_{f,i}$ คือ น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงช่วงเวลาต่างๆ ($kg_{dry\ solid}$)

ก3.5 ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง

เนื่องจากความชื้นกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆมีความชื้นไม่เท่ากันดังนั้นการหาความชื้นโดยเฉลี่ยสามารถหาได้โดยนำผลรวมของน้ำภายในกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงหารด้วยผลรวมมวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรงสามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ (ก10)

$$\%_{AVG} = \frac{\sum_{i=0}^{n} W_{w,i}}{\sum_{i=0}^{n} W_{d,i}} \times 100 \qquad (ก10)$$

เมื่อ $\%_{AVG}$ คือ ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (% d.b.)

$W_{w,i}$ คือ ผลรวมของน้ำภายในกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรง (kg)

$W_{d,i}$ คือ ผลรวมมวลแห้งของกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านตะแกรง ($kg_{dry\ solid}$)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลองและข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์

ข1.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

ตารางที่ ข1 ความหนาแน่นกากมันสำปะหลังผ่านสกรูรีดน้ำ

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก				
	กากมัน+ถ้วย(g)	น้ำ+ถ้วย(g)	ถ้วย(g)	กากมัน(g)	น้ำ(g)
1	275.70	409.50	101.30	174.40	308.20
2	284.60	409.70	101.50	183.10	308.20
3	272.36	409.70	101.50	170.86	308.20
เฉลี่ย	277.55	409.63	101.43	176.12	308.20

ตารางที่ ข2 ความหนาแน่นกากมันสำปะหลังสด

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก				
	กากมัน+ถ้วย(g)	น้ำ+ถ้วย(g)	ถ้วย(g)	กากมัน(g)	น้ำ(g)
1	313.19	409.50	101.30	211.89	308.20
2	328.80	409.70	101.50	227.30	308.20
3	321.09	409.70	101.50	219.59	308.20
เฉลี่ย	321.03	409.63	101.43	219.59	308.20

ข1.2 ตารางผลการทดลองที่ใช้หาอัตราการอบแห้ง

ตารางที่ ข3 การทดลองระหว่าง ความเร็วรอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (RPM)	เวลา (min)	ความชื้น % w.b.	ความชื้น % d.b.
100	2	ก่อนอบ	71.80	254.61
		30	60.40	152.53
		60	40.20	67.22
		90	28.80	40.45
		120	20.20	25.31
		150	14.00	16.28
100	4	ก่อนอบ	71.10	246.02

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข3 การทดลองระหว่าง ความเร็วรอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (RPM)	เวลา (min)	ความชื้น % w.b.	ความชื้น % d.b.
		30	50.90	103.67
100	4	60	30.50	43.88
		90	20.50	25.50
		120	12.80	13.70
100	6	ก่อนอบ	71.20	247.22
		30	35.60	55.28
		60	18.90	23.30
		90	12.20	13.90
120	2	ก่อนอบ	71.60	252.11
		30	54.60	120.26
		60	30.50	43.88
		90	20.10	25.16
		120	14.20	16.55
		150	10.60	11.86
120	4	ก่อนอบ	71.30	248.43
		30	50.40	101.61
		60	25.80	34.77
		90	10.60	11.86
		120	5.90	6.27
120	6	ก่อนอบ	70.90	243.64
		30	35.20	54.32
		60	15.70	18.62
		90	10.20	11.36

ตารางที่ ข4 การทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักป้อน (kg)	เวลา (min)	ความชื้น % w.b.	ความชื้น % d.b.
100	20	ก่อนอบ	72.00	257.14

ตารางที่ ข4 การทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังในถังอบและอุณหภูมิในการอบแห้ง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักป้อน (kg)	เวลา (min)	ความชื้น % w.b.	ความชื้น % d.b.
100	20	30	48.40	93.80
		60	22.20	28.53
		90	6.10	6.50
100	40	ก่อนอบ	70.60	240.14
		30	43.70	77.62
		60	20.50	25.79
		90	12.70	14.55
100	60	ก่อนอบ	70.00	233.33
		30	55.60	125.23
		60	46.30	86.22
		90	35.40	54.80
		120	24.90	33.16
		150	17.80	21.65
		180	13.60	15.74
120	20	ก่อนอบ	68.80	220.51
		30	34.60	52.91
		60	17.50	21.21
		90	2.50	2.56
120	40	ก่อนอบ	67.40	206.75
		30	40.70	68.63
		60	15.80	18.76
		90	5.10	5.37
120	60	ก่อนอบ	69.80	231.13
		30	55.40	124.22
		60	45.50	83.49
		90	35.20	54.32
		120	25.00	33.33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข1.3 ตารางผลการทดลองที่ใช้หาปริมาณน้ำที่ระเหยในการอบแห้งสัดส่วนคงค้างภายในถังอบ สัดส่วนการร่อนผ่านตะแกรง มวลแห้งสะสมที่ร่วงผ่านตะแกรง และ ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง

ตารางที่ ข5 การทดลองระหว่าง ความเร็วรอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (RPM)	เวลา (min)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (kg)	ความชื้น (% d.b.)
120	60	150	16.60	19.90
		180	7.50	8.11
100	2	ก่อนอบ	40.00	254.61
		30	6.10	198.51
		60	1.70	104.08
		90	0.90	62.87
		120	0.50	33.87
		150	0.40	16.55
		ค้างถังอบ	8.30	16.28
100	4	ก่อนอบ	40.00	246.02
		30	3.90	126.76
		60	1.30	68.07
		90	0.70	34.23
		120	0.40	15.87
		ค้างถังอบ	9.40	14.68
100	6	ก่อนอบ	40.00	247.22
		30	9.60	144.50
		60	1.60	34.59
		90	0.50	16.14
		ค้างถังอบ	6.80	13.90
120	2	ก่อนอบ	40.00	252.11
		30	4.90	175.48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข5 การทดลองระหว่าง ความเร็วรอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (RPM)	เวลา (min)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (kg)	ความชื้น (% d.b.)
120	2	60	1.80	60.51
		90	0.90	35.50
		120	0.80	20.77
		150	0.70	14.55
		ค้างถังอบ	7.30	11.86
120	4	ก่อนอบ	40.00	248.43
		30	3.80	114.13
		60	1.60	68.07
		90	0.70	21.36
		120	0.60	8.58
		ค้างถังอบ	8.10	6.27
120	6	ก่อนอบ	40.00	243.64
		30	8.40	116.45
		60	1.00	31.75
		90	0.40	12.61
		ค้างถังอบ	7.40	11.36

ตารางที่ ข6 การทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักป้อน (kg)	เวลา (min)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (kg)	ความชื้น (% d.b.)
100	20	ก่อนอบ	20.00	257.14
		30	5.40	136.41
		60	0.80	35.87
		90	0.60	8.81
		ค้างถังอบ	2.32	6.50
100	40	ก่อนอบ	40.00	240.14

ตารางที่ ข6 ผลการทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักป้อน (kg)	เวลา (min)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (kg)	ความชื้น (% d.b.)
100	40	30	10.70	149.38
		60	2.50	32.28
		90	0.50	16.01
		ค้างถังอบ	5.90	14.55
100	60	ก่อนอบ	60.00	233.33
		30	7.40	162.47
		60	3.40	102.84
		90	1.60	79.21
		120	0.90	43.68
		150	0.40	25.94
		180	0.10	17.65
		ค้างถังอบ	13.40	15.74
120	20	ก่อนอบ	20.00	220.51
		30	5.50	100.40
		60	1.20	24.53
		90	0.51	5.82
		ค้างถังอบ	2.10	2.56
120	40	ก่อนอบ	40.00	206.75
		30	10.50	117.86
		60	2.10	25.31
		90	0.89	11.23
		ค้างถังอบ	6.30	5.37
120	60	ก่อนอบ	60.00	231.13
		30	8.70	173.22
		60	2.80	93.05

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข6 ผลการทดลองระหว่าง ปริมาณกากมันสำปะหลังภายในถังอบ และ อุณหภูมิในการอบแห้ง (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักป้อน (kg)	เวลา (min)	น้ำหนักกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง (kg)	ความชื้น (% d.b.)
120	60	90	1.40	72.71
		120	0.90	46.84
		150	0.40	24.69
		180	0.10	11.73
		ค้างถังอบ	12.60	8.11

ข1.3 ข้อมูลที่ใช้ในการเลือกสภาวะในการลดความชื้นทางกล (Dewatering)

ตารางที่ ข7 ผลการทดสอบลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ระดับความเร็วรอบต่างๆ

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการอัดรีด (kg/hr)	ความชื้นกากอัดรีด (%MC)	ปริมาณน้ำที่ดึงออกได้ (% by weight)
70	171.91	75.30^{a}	26.10^{a}
90	204.75	77.09^{b}	20.21^{b}
120	192.66	76.82^{b}	20.04^{b}

ตารางที่ ข8 ผลการทดสอบลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ขนาดรูหัวดายต่างๆ

ขนาดรูหัวดาย (mm)	อัตราการอัดรีด (kg/hr)	ความชื้นกากอัดรีด (%MC)	ปริมาณน้ำที่ดึงออกได้ (% by weight)
6	203.17	71.51^{a}	37.80^{a}
12	249.00	75.61^{b}	27.07^{b}
24	253.79	81.82^{c}	18.49^{c}

a)กากอัดรีดจากหัวดาย 6 mm b)กากอัดรีดจากหัวดาย 12 mm c)กากอัดรีดจากหัวดาย 24 mm

รูปที่ ข1 ลักษณะของกากอัดรีดที่ได้จากหัวดายแต่ละขนาด

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

ค1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

ค1.1 ความหนาแน่น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นจากกากมันสำปะหลังหลังผ่านการลดความชื้นทางกล (เอ็กซ์ทรูชัน)

$$\text{Density}=\frac{\text{Mass(kg)}}{\text{Volume(m}^3\text{)}}$$

$$\text{Density}=\frac{0.1744\ \text{kg}}{0.0003082\ \text{m}^3}$$

$$\text{Density} = 565.87\ \text{kg/m}^3$$

ค1.2 ความชื้น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาความชื้นของกากมันสำปะหลังผ่านการลดความชื้นทางกล

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_{wb}=\frac{W_1 - W_2}{W_1}\times 100$$

$$M_{wb}=\frac{5.04-1.41}{5.04}\times 100$$

$$M_{wb}=72.02\%$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_{db}=\frac{W_1 - W_2}{W_2}\times 100$$

$$M_{db} = \frac{5.04-1.41}{1.41} \times 100$$

$$M_{db}=257.45\%$$

ค2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค2.1 ปริมาณน้ำที่ระเหยในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

ใช้สภาวะความเร็วรอบ 6 rpm อุณหภูมิลมร้อน 100 ºC ปริมาณกากมันในถังอบ 40 kg (14% ของปริมาตรถังอบ)

$$W_w=\frac{W_d \times M_{db}}{100}$$

$$W_w=\frac{11.76 \times 240.14}{100}$$

$$W_w = 28.24 \text{ kg-water}$$

$$W_{w,t}=W_{in}+\sum_{i=0}^{n} W_{w,i}$$

$$W_{w,t}=0.75+(6.41+0.61+0.07)$$

$$W_{loss}=28.24 - 7.84$$

$$W_{loss}= 20.40 \text{ kg - water}$$

ค2.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังใช้สภาวะความเร็วรอบ 6 rpm อุณหภูมิลมร้อน 100 ºC ปริมาณกากมันในถังอบ 40 kg (14% ของปริมาตรถังอบ) โดยแยกพลังงานความร้อนเป็น 2 ส่วนดังนี้

1.ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

$$\text{Energy} = \frac{HHV_{LPG} \times M_{LPG}}{t \text{ x } 3600}$$

$$\text{Energy} = \frac{50{,}220 \ {}^{kJ}/_{kg} \times 2.10 \text{ kg}}{1.5 \text{ h x } 3600 \ {}^{s}/_{h}}$$

Energy = 19.53 kW

2.ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าดูจากมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (1.7 kW)
ดังนั้นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) คือ

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{T_{Energy} \text{ x t x } 3600}{W_{loss}}$$

$$\text{Specific Energy Consumption, SEC} = \frac{(19.53 + 1.70)\text{kW x } 1.5\text{h x } 3600 \ {}^{s}/_{h}}{20.40 \text{ kg - water}}$$

SEC = 5,619.706 kJ/kg-water (5.62MJ/ kg-water)

ค3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

โดยคิดจากความชื้นที่ออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง มีหน่วยเป็น (%db/h)

$$DR = \frac{M_{pi} - M_{pf}}{t}$$

$$DR = \frac{240.14\%db - 77.62\%db}{0.5h}$$

DR = 325.04 %db/h

ค4 มวลแห้งสะสมที่ร่วงผ่านตะแกรง

$$W_{f,a}=\sum_{i=0}^{n} W_{f,i}$$

$$W_{f,a}= 4.29 + 1.89 + 0.43$$

$$W_{f,a} = 6.61\ kg_{\ dry\ solid}$$

ค5 สัดส่วนคงค้างภายในถังอบตะแกรงทรงกระบอก

$$\%_r = \frac{\sum_{i=0}^{n} W_{r,i}}{W_a} \times 100$$

$$\%_r = \frac{5.15}{11.76} \times 100$$

สัดส่วนคงค้างภายในถังอบตะแกรงทรงกระบอก = 43.79 %

ค6 สัดส่วนการร่อนผ่านตะแกรง

$$\%_f = \frac{\sum_{i=0}^{n} W_{f,i}}{W_a} \times 100$$

$$\%_f = \frac{(4.29+1.89+0.43)}{11.76} \times 100$$

สัดส่วนการร่อนผ่านตะแกรง = 56.21 %

ค7 ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง

$$\%_{AVG} = \frac{\sum_{i=0}^{n} W_{w,i}}{\sum_{i=0}^{n} W_{d,i}} \times 100$$

$$\%_{AVG} = \frac{(6.41 + 0.61 + 0.07)}{(4.29+1.89+0.43)} \times 100$$

ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังร่วงผ่านตะแกรง = 107.26 % d.b.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

วิเชียร ดวงสีเสน เทวรัตน์ ทิพยวิมล และ วีรชัย อาจหาญ (2555). **การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. หน้า 660-666.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

POE 33

การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน
A STUDY OF DRYINGCASSAVAPULP USING A ROTARY SCREEN DRYER

วิเชียร ดวงสีเสน[1] เทวรัตน์ ทิพยวิมล[2] และ วีรชัย อาจหาญ[2*]
Wichian Duangsrisen[1]Tawarat Tipyavimol[2] and Weerachai Arjharn[2*]

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000
[2] อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000
* ติดต่อ:Email: arjharh@g.sut.ac.th,โทรศัพท์: 044 225 007, โทรสาร: 044 225 046

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาลักษณะการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน(Rotary Screen Dryers) โดยวัสดุอบแห้งจะเคลื่อนที่ผ่านรูตะแกรงลงสู่ด้านล่างการทดสอบครั้งนี้ใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนมีขนาดรูตะแกรง 3 mm ความจุ 0.5 m^3 ใช้ความเร็วรอบถังหมุน 3 ความเร็วรอบ คือ 2 rpm, 4 rpm และ 6 rpm และใช้อุณหภูมิลมร้อน 2 ช่วงคือ 80°C และ 100°C ทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการร่อนผ่านรูตะแกรงและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำในสภาวะต่างๆ พบว่าที่ความเร็วรอบ 6 rpm และอุณหภูมิ 100°C ให้ปริมาณกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง มากกว่าที่สภาวะอื่นๆ คือ 2.29 $kg_{dry\ mass}$มีความชื้นเฉลี่ย 34.45$\%_{wb}$ และ มีประสิทธิภาพการร่อน 58.37$\%_{dry\ mass}$ ซึ่งมากกว่าที่สภาวะอื่นๆ ใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ 8.05 MJ/kg-water มีมวลคงค้างในถังตะแกรงทรงกระบอก 41.55$\%_{dry\ mass}$ ความชื้น 35$\%_{wb}$

คำสำคัญ:กากมันสำปะหลัง การลดความชื้น เครื่องอบแห้งแบบหมุน

Abstract

This research aims to study the drying of cassava pulp by rotary screen dryer. Rotary screen dryer was used in this study with 3 mm of rotary screen and capacity of 0.5 m^3. The experiment was performed by cassava pulp drying at speed follow as: 2, 4 and 6 rpm and different drying air temperatures of 100°C and 80°C were set as drying conditions. Efficiency of screening and specific energy consumption (SEC) was determined to evaluate the cassava pulp drying. The result showed that, the most suitable temperature and speed was 100°C and 6 rpm, respectively. The above conditions, it used specific energy consumption is 8.05 MJ/kg-water and the cassava pulp can pass through a sieve of 2.29 kg (equivalent to 58.37%) and average moisture content of cassava pulp is equal to34.45%. The cassava is residue in the sieve has average moisture content of 35%.

***Keywords**:* cassava pulp, drying, rotary screen dryer

1. บทนำ

ประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังกว่า 20 ล้านตันต่อปี [1] ผลผลิตหัวมันสำปะหลังทั้งหมดในประเทศไทย 50% จะนำไปผลิตเป็น มันเส้น/มันอัดเม็ด และอีก 50% จะนำไปผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการผลิตมันเส้นและมันอัดเม็ดพบว่าจะไม่มีผลพลอยได้ (By- Product) เกิดขึ้นแต่ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะเกิด By-Product คือ เปลือกมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังโดยในกระบวนการสกัดแป้งมันสำปะหลังจะก่อให้เกิดวัสดุผลพลอยได้ในปริมาณมากในรูปกากมันสำปะหลัง (หัวมันสำปะหลังสด 1 ตันจะให้ปริมาณกากมันสำปะหลังประมาณ 60 กิโลกรัม)คิดเป็น 600,000 ตันต่อปี อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีของกากมันสำปะหลังพบว่ามี แป้ง 68.89%,โปรตีน 1.55%, เยื่อใย 27.75%, ไขมัน 0.12%, pH 4.99%, เถ้า 1.70% ซึ่งมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้มากเนื่องจากกากมันสำปะหลังมี องค์ประกอบของแป้งสูงปริมาณแป้งที่เหลืออยู่ในกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักแห้งมีสูงถึง 68.89% จึงนิยมนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์ หรือนำไปใช้แหล่งคาร์บอนให้จุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบ Solid-state ใช้กันมากในการผลิตสารประกอบต่างๆ ที่ใช้กันในอุตสาหกรรม สำหรับประเทศไทย กากมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะนำไปใช้ผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ดและอาหารสัตว์ กากมันสำปะหลังที่ออกมาจากกระบวนการผลิตมีความชื้นสูงประมาณ 60- 82% จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก และเป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ โดยหากปล่อยทิ้งไว้จะเกิดสภาพการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนชุมชนที่อยู่รอบข้าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเพื่อให้สามารถเก็บรักษาและนำไปใช้ประโยชน์ได้ในปัจจุบันการลดความชื้นกากมันสำปะหลังยังใช้วิธีการตากลานคอนกรีตขนาดใหญ่ในช่วงฤดูฝนการตากจะเป็นไปได้ยากทำให้กากมันสำปะหลังบางส่วนไม่สามารถตากได้ทันทำให้สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์และการนำเทคโนโลยีการทำแห้งมาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปกากมันสำปะหลังยังคงมีน้อยทำให้ขาดแคลนทางเลือกของเทคโนโลยีในการนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม

จากการตรวจเอกสาร เทคโนโลยีการอบแห้งกากมันสำปะหลังพบว่า มีการศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้สายพานอบแห้งแบบต่อเนื่อง [2]โดยทำการทดลองเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นที่เวลาต่างกันของการอบแห้งกากมันสำปะหลัง ผลการทดลองพบว่าความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาการอบแห้งอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้นจุดที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในการทดลองนี้คือความเร็วลมร้อน 8 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง80°Cทำให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นลดลงเหลือ 7.69 $\%_{wb}$ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 2 ชั่วโมง

อย่างไรก็ดีผู้เขียนได้ทำการพิจารณาสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลังที่ออกมาจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังพบว่า กากมันสำปะหลังมีความชื้นสูง เหนียว และจับตัวกันเป็นก้อนการเกลี่ยกระจายกากมันสำปะหลังให้ทั่วสายพานอบแห้ง และการทำให้เป็นชั้นบางทำได้ค่อนข้างยาก

จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการอบแห้งที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งกากมันสำปะหลังคือ การอบแห้งแห้งแบบถังหมุน หรือแบบโรตารี่ (Drum orRotary Dryers) ใช้หลักการหมุนของตัวถังทรงกระบอกของเครื่องอบแห้ง มีครีบหรือใบพาช่วยโรยวัสดุอบผ่านอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการลดความชื้น [3]โดยมีการนำการอบแห้งแบบถังหมุน มาใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ผลการศึกษาพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยคิดในรูปพลังงานปฐมภูมิต่อปริมาณน้ำที่ระเหยมีค่าประมาณ 8 - 25 MJ/kg-water [4]นอกจากนี้ยังมีการทดลองการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ ผลการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำการระเหยน้ำออกจากชิ้นมันได้ในอัตรา 140.18 kg/hr

และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ10.07 MJ/kg-water สามารถลดความชื้นของมันเส้นให้มีค่า ต่ำกว่า 13$\%_{wb}$ จากความชื้นเริ่มต้น 60 $\%_{wb}$ [5] ซึ่งเมื่อทำการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังเบื้องต้นโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ พบว่าขณะที่ถังอบแห้งหมุนนั้นกากมันสำปะหลังจะจับตัวกันเป็นก้อนกลมคล้ายกับการปั้นเม็ด และมีความชื้นสะสมอยู่ด้านในสูงสมรรถนะในการอบกากมันสำปะหลังต่ำ

จากการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมกับการอบแห้งกากมันสำปะหลังยังมีน้อย จำเป็นต้องมีการพัฒนาให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ประกอบการ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งกากมันสำปะหลังแนวคิดใหม่ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ โดยให้ถังอบมีลักษณะเป็นตะแกรง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เครื่องอบแบบตะแกรงหมุน (Rotary Screen Dryer) ซึ่งจะเป็นการอบแห้งตกผ่านรูตะแกรง สามารถลดการจับตัวเป็นก้อนของกากมันสำปะหลังได้มาใช้ในการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อ ศึกษาลักษณะการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าว สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบ

2.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้งแบบโรตารี ขนาดความจุ 0.5 m^3 ขนาดรูตะแกรง 3 mm พร้อมแหล่งความร้อนใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิง

2.กากมันสำปะหลัง

3.เครื่องชั่ง

4.เครื่องหาความชื้นแบบอินฟาเรด

5.ชุดควบคุม

รูปที่ 1 เครื่องอบแห้ง

รูปที่ 2 กากมันสำปะหลังสดจากโรงงาน

2.2 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

2.2.1ทดสอบและเก็บข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ

เตรียมกากมันสำปะหลังซึ่งได้จากโรงงานแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา ชั่งน้ำหนัก 20 kg ใส่เข้าถังอบปิดฝาเครื่องอบแล้วทำการตั้งอุณหภูมิ เปิดระบบการทำงานของเครื่องอบโดยกำหนดอุณหภูมิลมร้อน 80°C ความเร็วรอบของตะแกรงหมุน 2 rpm จดบันทึกน้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ตกผ่านรูตะแกรง ความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ตกผ่านรูตะแกรง โดยบันทึกค่าทุกๆ 30 นาที จนกระทั่งตัวอย่างหยุดหล่นจากรูตะแกรง บันทึกพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด ทำซ้ำโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C ทำการทดลองด้วยวิธีการตามข้างต้นโดยเปลี่ยนความเร็วรอบตะแกรงเป็น 4 และ 6 rpm ตามลำดับ

2.2.2การประเมินสมรรถนะในการอบแห้ง

ในการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนนี้จะมีการประเมินสมรรถนะในการอบแห้งแตกต่างจาก

วิธีการอบแห้งแบบปกติ เนื่องจากขณะทำการอบแห้งกากมันสำปะหลังจะตกผ่านรูตะแกรงออกไปอย่างต่อเนื่อง โดยการวิเคราะห์ระยะเวลาในการอบแห้งจะกระทำพร้อมกับประสิทธิภาพการร่อนผ่านรูตะแกรงในช่วงเวลาต่างๆ โดยความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ตกผ่านรูตะแกรง

2.2.3วิเคราะห์หาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ(Specific Energy Consumption, SEC) คือค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำระเหยมีหน่วยเป็น MJ/kg-waterโดยพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังมี 2 ส่วนดังนี้

ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน โดยใช้สมการ

$$Energy = \frac{HHV \times M_{LPG}}{t \times 3600}$$

โดยที่

Energy คือ พลังงานที่เข้าไปในระบบ (kW)

HHV คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)

M_{LPG} คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg)

t คือเวลาในการอบแห้ง (hr)

ในการทดสอบครั้งนี้ใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงของแหล่งความร้อนในการอบแห้งซึ่งมีค่าความร้อน (HHV) 55,000 kJ/kg

ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากมอเตอร์ต้นกำลัง และอุปกรณ์ควบคุมต่างๆโดยดูจากมิเตอร์ ไฟฟ้า

ดังนั้นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ(Specific Energy Consumption, SEC) หาได้จากสมการ

$$\mathrm{SEC} = \frac{T_{\mathrm{Energy}} \times t \times 3600}{W_{loss}}$$

โดยที่

SECคือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)

T_{Energy}คือ พลังงานรวมที่เข้าไปในระบบ (MW)

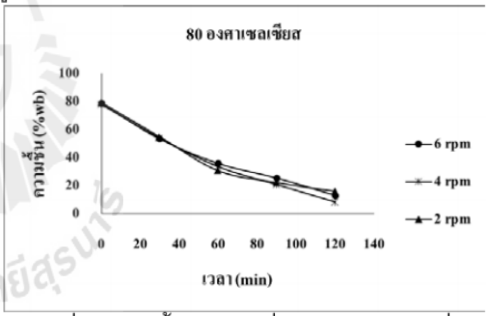
t คือเวลาในการอบแห้ง (hr)

W_{loss}คือ น้ำหนักน้ำที่หายไปเฉลี่ยทั้งที่ตกผ่านรูตะแกรงและที่ค้างอยู่ในถังอบ(kg)

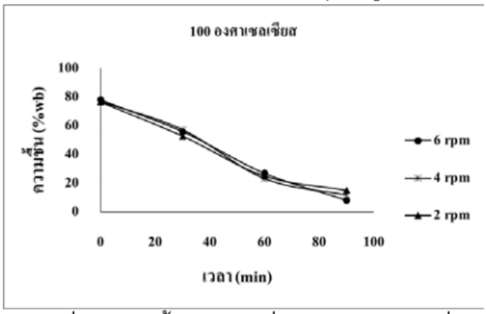
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1เวลาในการอบแห้งน้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ร่วงจากตะแกรง

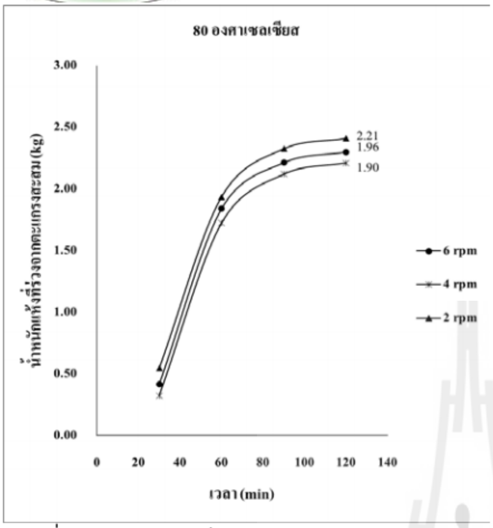
จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ตกผ่านรูตะแกรงที่อุณหภูมิ 80°C และ 100°C ตามรูปที่ 3 และ 4 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งของการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100°C จะมีระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 80°C ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานที่ใส่เข้าไปในการอบแห้งมีสูงกว่า เมื่อพิจารณาอัตราการตกผ่านรูตะแกรงของกากมันสำปะหลังจะเริ่มสูงขึ้นเมื่อความชื้นในช่วง 25-35%$_{wb}$ ทั้งการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 80°Cและ 100°Cโดยมีปริมาณกากมันสำปะหลังที่ตกผ่านรูตะแกรงสะสมในช่วงความชื้นดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 5 และ 6



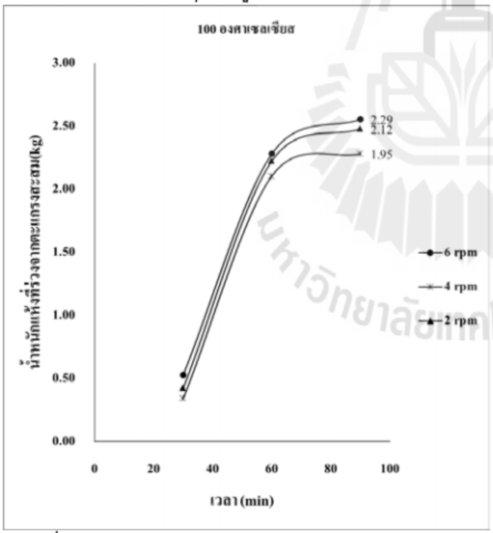
รูปที่ 3 ความชื้นของวัสดุที่ตกผ่านรูตะแกรง ที่ความเร็วรอบ 2, 4 และ 6 rpm อุณหภูมิ 80°C



รูปที่ 4 ความชื้นของวัสดุที่ตกผ่านรูตะแกรง ที่ความเร็วรอบ 2, 4 และ 6 rpm อุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งและน้ำหนักแห้งที่ตกผ่านรูตะแกรงสะสมที่อุณหภูมิ 80°C



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการอบแห้งและน้ำหนักแห้งที่ตกผ่านรูตะแกรงสะสมที่อุณหภูมิ 100°C

โดยความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังที่ได้จากการอบแห้งกากมันสำปะหลังแสดงไว้ในตารางที่1 พบว่า กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งยังคงมีความชื้นที่สูงไม่สามารถเก็บรักษาได้ จำเป็นที่จะต้องนำไปลดความชื้นให้มีความชื้นไม่เกิน 13%$_{wb}$ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษา

ตารางที่1ความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังที่ผ่านตะแกรงและกากมันสำปะหลังที่ค้างในถังอบ

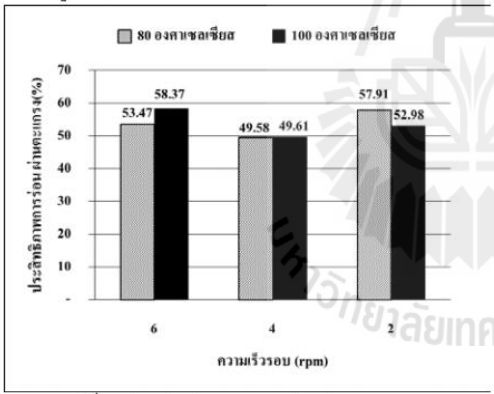
อุณหภูมิ °C	ความเร็วรอบ RPM	ความชื้นเฉลี่ย %wb	
		กากมันผ่านตะแกรง	กากมันค้างตะแกรง
100	2	31.13	37.00
	4	30.85	34.00
	6	34.45	35.00
80	2	36.61	48.90
	4	34.96	32.00
	6	39.50	32.20

3.2ประสิทธิภาพการตกผ่านรูตะแกรง

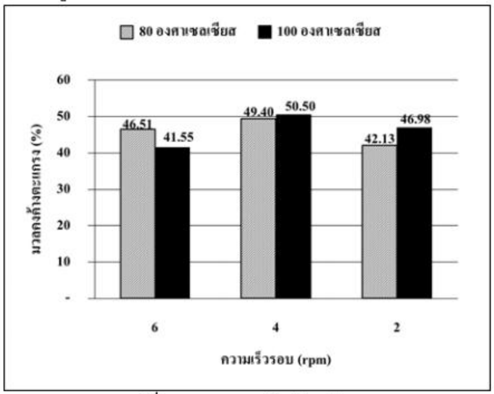
จากการทดลองพบว่าได้กากมันสำปะหลังสองส่วนคือส่วนแรกเป็นส่วนที่ร่วงจากรูตะแกรง รูปที่ 7 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นผงเส้นใยขนาดเล็กตามขนาดรูตะแกรงสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่จำเป็นต้องย่อยละเอียดอีกซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการส่วนที่สองเป็นกากมันสำปะหลังที่จับตัวกันเป็นก้อนค้างอยู่ในถังตะแกรงทรงกระบอก รูปที่ 8เป็นส่วนที่ไม่สามารถแตกตัวภายในถังได้จึงจำเป็นต้องนำออกมาย่อยก่อนอบอีกครั้ง จากการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการร่อนของตะแกรงพบว่าประสิทธิภาพการร่อนมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของถังตะแกรงทรงกระบอกและอุณหภูมิในห้องอบแห้งจากที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1เมื่อความเร็วรอบสัมพันธ์กับความชื้นที่ลดลงจะทำให้ได้กากมันที่ร่วงจากตะแกรงมากประสิทธิภาพการร่อนผ่านตะแกรงจะมากตามไปด้วยจากรูปที่ 9 จะเห็นว่าที่ความเร็วรอบ 6 rpm จะมีประสิทธิภาพการร่อนมากกว่าที่สภาวะอื่นๆคือ 58.37%$_{dry\ mass}$และจากรูปที่ 10 ที่ความเร็วรอบ 6 rpm จะมีมวลคงค้างตะแกรงน้อยกว่าที่สภาวะอื่นๆคือ 41.55%$_{dry\ mass}$

รูปที่ 7 กากมันสำปะหลังที่ร่วงจากตะแกรง

รูปที่ 8 กากมันสำปะหลังที่คงค้างในถังอบ



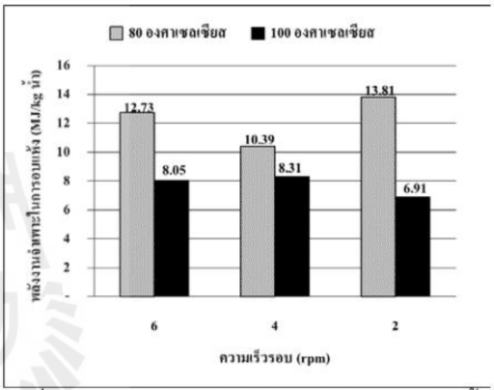
รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการร่อนผ่านตะแกรง



รูปที่ 10 มวลคงค้างในถังอบ

3.3พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำที่ความเร็วรอบ 2 rpm, 4 rpm และ 6 rpmอุณหภูมิ 80°C และ 100°C พบว่าความเร็วรอบการหมุนของตัวถังตะแกรงทรงกระบอกแต่ละความเร็วรอบใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำแตกต่างกันไป แต่ที่อุณหภูมิ 100°Cใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำน้อยกว่าอุณหภูมิ 80°C เนื่องจากว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลงทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำน้อยลงด้วย



รูปที่ 11 เปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ
ที่ความเร็วรอบ 2, 4 และ 6 rpm
อุณหภูมิ 80°C และ 100°C

3.4การประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน

จากการทดสอบจะเห็นว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งแบบตะแกรงหมุนมีความชื้นอยู่ระหว่าง 31-37%$_{wb}$มีความแตกต่างกันที่ขนาดของกากมันสำปะหลัง คือ ขนาดน้อยกว่า 3 mm และขนาดมากกว่า 3 mm โดยให้สัดส่วน 58 : 42ตามลำดับ ซึ่งการนำกากมันสำปะหลังแห้งนี้ไปใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบจึงสามารถทำได้ เช่น ในส่วนของกากมันสำปะหลังแห้งที่มีขนาดน้อยกว่า 3 mm นำไปผลิตเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์แป้งค่อนข้างสูงส่วนขนาดมากกว่า 3 mm สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์เส้นใยเซลลูโลสสูง ซึ่งจำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไป

4.สรุปผล

จากการทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ที่ความเร็วรอบ 6 rpmและอุณหภูมิ 100°Cให้ปริมาณกากมันสำปะหลังที่ร่วงผ่านรูตะแกรง มากที่สุด คือ 2.29 $kg_{dry\ mass}$มีความชื้นเฉลี่ย 34.45$\%_{wb}$

2. ที่ความเร็วรอบ 6 rpmและอุณหภูมิ 100°C มีประสิทธิภาพการร่อนมากกว่าที่สภาวะอื่นๆคือ 58.37$\%_{dry\ mass}$แต่ยังมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงมีแนวทางที่จะพัฒนารูปแบบการอบแห้งด้วยการเพิ่มขนาดรูตะแกรงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการร่อนที่สูงขึ้นลดปริมาณกากมันสำปะหลังที่จับตัวเป็นก้อนในถังตะแกรงทรงกระบอก

3.มวลคงค้างในถังตะแกรงทรงกระบอกที่ความเร็วรอบ 6 rpm และอุณหภูมิ 100°C มีมวลคงค้างน้อยที่สุดคือ41.55$\%_{dry\ mass}$โดยมีความชื้น 35$\%_{wb}$

4. ที่ความเร็วรอบ 6 rpm และอุณหภูมิ 100°C มีความชื้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังที่ตกผ่านรูตะแกรง คือ 34.45$\%_{wb}$ จะต้องลดความชื้นอีกเพื่อให้สามารถจัดเก็บได้ ส่วนความชื้นของมวลคงค้างในถังตะแกรงทรงกระบอกมีความชื้น 35$\%_{wb}$จะต้องนำไปลดขนาดก่อนลดความชื้นอีกครั้ง

5. ที่ความเร็วรอบ 6 rpmและอุณหภูมิ 100°Cใช้พลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ 8.05 MJ/kg-water

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2551). มันสำปะหลังทำเป็นฝอย. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน; 2 กันยายน 2551.

[2] สุระ ตันดี. (2553). คุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง. โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรมครั้งที่ 1 ประจำปีการศึกษา 2553, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น.

[3] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[4] กิตติพงษ์ กุลมาตย์. (2537). การอบแห้งข้าวเปลือกแบบถังทรงกระบอกหมุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[5] วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2552). การพัฒนากระบวนผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล. ภาคีศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ประวัติผู้เขียน

นายวิเชียร ดวงสีเสน เกิดเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2528 เป็นบุตรของนายอุดม ดวงสีเสน และนางบุญเรือน ดวงสีเสน เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 โรงเรียนบ้านหนองฮาง อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด ชั้นมัธยมศึกษาที่ 1-2 โรงเรียนเสลภูมิ อำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด ชั้นมัธยมศึกษาที่ 3-6 โรงเรียนเจ้าพระยาวิทยาคม เขตยานนาวา กรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2551

ในปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนจากแหล่งทุนภายนอก กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา และทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำศูนย์ความปีนเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นผู้ร่วมวิจัยในเรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล ทุนวิจัยจากศูนย์นวัตกรรมหลังการเก็บเกี่ยว เป็นผู้ร่วมวิจัยในโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2 โครงการคือ โครงการการรีไซเคิลลำไยค้างสต๊อค ปี 2546/2547 โดยใช้เป็นพลังงานชีวมวล และโครงการหมู่บ้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน และเป็นผู้ร่วมวิจัยในโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2 โครงการคือ โครงการการแปรรูปกากมันสำปะหลังเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน และ โครงการการศึกษาและส่งเสริมการใช้ระบบผลิตพลังงานความร้อนด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่นสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

ผลงานวิจัยในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 วันที่ 4-5 เมษายน พ.ศ. 2555 เรื่องการศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน