

การพัฒนากระบวนการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบ
ลูกกลิ้งคู่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**DEVELOPMENT OF DRYING PROCESS FOR
CASSAVA PULP WITH DOUBLE DRUM DRYER**



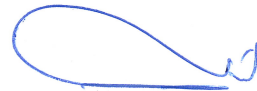
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical and Process
System Engineering Suranaree University of Technology**

Academic Year 2019

การพัฒนากระบวนการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



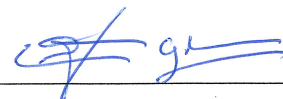
(ผศ. ดร.พวงศักดิ์ จิตยเสน)

กรรมการ



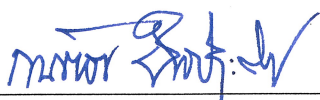
(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ



(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกียรติศักดิ์ ใจโต : การพัฒนากระบวนการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (DEVELOPMENT OF DRYING PROCESS OF CASSAVA PULP WITH DOUBLE DRUM DRYER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, 141 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยทำการออกแบบ สร้างเครื่องต้นแบบซึ่งประกอบด้วย 1) ลูกกลิ้งเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอกหนา 4 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 26.5 cm ยาว 60 cm จำนวน 1 คู่ 2) ไบมีดชุดผลิตภัณฑ์ 3) ฮีตเตอร์อินฟราเรด 4) ตู้ควบคุม 5) มอเตอร์ไฟฟ้า และ 6) โครงสร้างของเครื่อง ประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องต้นแบบจากความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อัตราการอบแห้ง ความสามารถในการอบแห้งโดยทำการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 84.55% (มาตรฐานเปียก) ปริมาณ 1 kg ด้วยอุณหภูมิลูกกลิ้ง 130 140 และ 150°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 0.30 และ 0.50 mm ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้ง 0.19 0.34 และ 0.51 rpm ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งของ Newton และ Page และศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง ผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.3 mm ความเร็วรอบ 0.34 rpm เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด กากมันสำปะหลังแห้งที่ได้มีความชื้นสุดท้าย 8.03% (มาตรฐานเปียก) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 4.17 MJ/kg อัตราการอบแห้ง 3.00 kg/h และความสามารถในการทำแห้ง 59.85 g/min ผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งพบว่าแบบจำลองของ Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งกากมันสำปะหลัง และพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่ 130 140 และ 150°C ไม่ส่งผลให้ค่าสมบัติทางเคมีกายภาพลดลง

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา เกียรติศักดิ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค

KIATTISAK JAITO : DEVELOPMENT OF DRYING PROCESS OF
CASSAVA PULP WITH DOUBLE DRUM DRYER. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. TAWARAT TREEAMNUK, D.Eng., 141 PP

CASSAVA PULP/DOUBLE DRUM DRYER/ DRYING/MATHEMATICAL MODEL

The objective of this research was to development of drying process of cassava pulp with a double drum dryer. The prototype of dryer was designed and constructed with the dryer consist of 1) one pair of stainless steel cylindrical with 4 mm of thickness, diameter of 26.5 cm and 60 cm of long, 2) product scraping blade, 3) infrared heater, 4) control panel, 5) electric motor, and 6) frame of structure. Evaluate the performance of the dryer in terms of moisture content of dried product, specific energy consumption (SEC), drying rate (DR), and drying capacity (DC) by drying 1 kg of cassava pulp at an average initial moisture content of 84.55% (wet basis), drum temperature of 130, 140 and 150°C, distance between rollers of 0.15, 0.30 and 0.50 mm, roller speed of 0.19, 0.34 and 0.51 rpm. The drying characteristic were studied with Newton and Page drying kinetic models. And the physico-chemical properties were investigated. The results showed that 140°C of drum temperature, distance between rollers of 0.3 mm and 0.34 rpm of rotating speed was the most appropriate drying condition. The dried product has moisture content of 8.03% (w.b.), SEC of 4.17 MJ/kg, DR of 3.00 kg/h and DC of 59.85 g/min. The page's model is suitable for predict the drying characteristic of cassava pulp and the drum temperature at 130, 140 and 150°C did not affect to reduce the physico-chemical properties of cassava pulp.

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature กีตติศักดิ์

Advisor's Signature ทวารัต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา การอบรมสั่งสอน ความรู้ คำชี้แนะ การช่วยเหลือในการทำวิจัย และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุศักดิ์ จุลยุเสนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย รวมถึงคุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ ที่กรุณาช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเอกสารตลอดการวิจัยนี้ อาจารย์ ดร.นาฏชนก ปรางปรุ ดร.เกรียงไกร ราษฎร์สุข และน้อง ๆ บัณฑิตทุกท่าน ที่ช่วยในการทดสอบและทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ วิทยานิพนธ์ได้รับการสนับสนุนการวิจัยแผนงานพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณปี 2563

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวซึ่งให้การอบรมเลี้ยงดู และสนับสนุนส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

เกียรติศักดิ์ ใจโต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กากมันสำปะหลัง	4
2.1.1 ลักษณะของกากมันสำปะหลัง	4
2.1.2 การนำกากมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์	6
2.2 ความชื้นในวัสดุ	8
2.3 การหาความชื้นในวัสดุเกษตรและอาหาร	10
2.4 การอบแห้ง	12
2.4.1 ช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น	13
2.4.2 ช่วงการอบแห้งคงที่	13
2.4.3 ช่วงการอบแห้งลดลง	14
2.5 การอบแห้งกากมันสำปะหลัง	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	18
2.6.1 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว.....	20
2.6.2 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	20
2.6.3 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่หมุนออกจากกัน.....	20
2.7 การถ่ายเทความร้อน.....	21
2.7.1 การนำความร้อน.....	21
2.7.2 การพาความร้อน.....	23
2.7.3 การแผ่รังสีความร้อน.....	25
2.7.4 การถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อนรวมกัน.....	27
2.7.5 การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ.....	27
2.7.6 การนำความร้อนของทรงกระบอก.....	28
2.7.7 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแห้งแบบลูกกลิ้ง ที่พัฒนา.....	30
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง.....	31
3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง.....	32
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	32
3.2.2 วิธีการทดสอบหาความหนาแน่น.....	34
3.3 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ต้นแบบ.....	38
3.3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	38
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	39
3.3.3 หลักเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบ.....	39
3.3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	39
3.4 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ลูกกลิ้งคู่.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	42
3.4.2 วิธีการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	43
3.4.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง.....	44
3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	45
3.5.1 การอบแห้งเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	45
3.5.2 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
3.5.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและค่าพลังงานกระตุ้น.....	47
3.6 การวิเคราะห์ค่าคุณภาพของกากมันสำปะหลัง.....	49
3.6.1 การวิเคราะห์ความชื้น.....	49
3.6.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า.....	49
3.6.3 การวิเคราะห์หาไขมันหยาบ.....	50
3.6.4 การวิเคราะห์หาโปรตีน.....	51
3.6.5 การวิเคราะห์หาเชื้อใยหยาบ.....	52
3.6.6 การหาคาร์โบไฮเดรต.....	52
3.7 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	52
4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล	
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง.....	53
4.1.1 ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง.....	53
4.1.2 ความหนืดของกากมันสำปะหลัง.....	54
4.2 ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	62
4.2.1 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งต้นแบบ.....	62
4.2.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	63
4.3 ผลการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลัง.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1	ความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลัง..... 64
4.3.2	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ..... 71
4.3.3	อัตราการอบแห้ง..... 72
4.3.4	ความสามารถในการอบแห้ง..... 73
4.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลัง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่..... 76
4.4.1	พารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้ง กากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่..... 80
4.4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและ พลังงานกระตุ้น..... 85
4.4.3	องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง..... 86
4.5	ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ..... 87
4.6	ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบ ลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง..... 88
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 89
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 90
รายการอ้างอิง 91
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	ตารางผลการทดลอง..... 97
ภาคผนวก ข.	ตัวอย่างการคำนวณ..... 115
ภาคผนวก ค.	แบบเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง..... 125
ภาคผนวก ง.	รูปประกอบการทดลอง..... 128
ภาคผนวก จ.	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์..... 135
ภาคผนวก ฉ.	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... 139
ประวัติผู้เขียน 141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะทางกายภาพของกากมันสำปะหลังต่อ 100 g..... 5
2.2	ลักษณะทางชีวเคมีของกากมันสำปะหลังต่อ 100 g..... 5
2.3	องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง..... 6
2.4	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน..... 25
4.1	ความหนาแน่นที่ระดับความลึกกากมันสำปะหลังที่ 10 50 และ 50 cm..... 53
4.2	แรงบิดสูงสุดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นและความเร็วในการหมุน ที่แตกต่างกัน โดยใช้ Rotational viscometer..... 57
4.3	แรงเฉือนสูงสุดและความหนืดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นและอัตรา เฉือนแตกต่างกัน..... 61
4.4	ค่าความชื้นสุดท้าย อัตราการอบแห้ง ความดันเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ และความสามารถในการทำแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ด้วยเครื่อง อบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่..... 67
4.5	ค่าคงที่การอบแห้งแบบชื้นบางและค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการ อบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง..... 81
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกากมันสำปะหลัง..... 85
4.7	องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง..... 87
4.8	การเปรียบเทียบสมรรถนะและรูปแบบการอบแห้งกากมันสำปะหลัง..... 87
ก.1	ความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง..... 98
ก.2	ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังที่ระดับความลึก 10 50 และ 100 cm..... 98
ก.3	แรงดันไฟฟ้า Torque transducer เทียบกับแรงบิดตามทฤษฎี..... 99
ก.4	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่าง ระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm..... 100
ก.5	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่าง ระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm..... 101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.6	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm.....	102
ก.7	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm.....	103
ก.8	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm.....	104
ก.9	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm.....	105
ก.10	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm.....	106
ก.11	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm.....	107
ก.12	ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm.....	108
ก.13	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm.....	108
ก.14	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm.....	109
ก.15	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm.....	109
ก.16	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm.....	110
ก.17	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm.....	110
ก.18	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm.....	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
ก.19	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm.....	111
ก.20	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm.....	112
ก.21	อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm.....	112
ก.22	ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง.....	113
ก.23	ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	114

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	คู่มือ	11
2.2	เครื่องวัดความชื้นด้วยระบบอินฟราเรด FD-610	12
2.3	ความสัมพันธ์ของการอบแห้ง	15
2.4	เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งประเภทต่าง ๆ	19
2.5	การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด x	22
2.6	การกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหลขณะเกิดการพาความร้อน บริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน	23
2.7	การพาความร้อนในชั้นขีดผิวความร้อนและชั้นขีดผิวความเร็ว	24
2.8	การแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อม โดยรอบ	26
2.9	การนำความร้อนของทรงกระบอก	29
3.1	ตัวอย่างกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการอบแห้ง	31
3.2	คู่มือความร้อน	32
3.3	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	33
3.4	เหล็กทรงกระบอก	33
3.5	ชุดวัดความหนืด Proposed high-torque vane rheometer scheme for yield stress and viscosity measurement	34
3.6	ลักษณะของใบ Vane มีความสูง (H) เป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	36
3.7	เครื่องอบแห้งลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง	43
3.8	ป้อนกากมันสำปะหลังเข้าเครื่องอบแห้ง	44
3.9	เตาเผาหาปริมาณเถ้าของกากมันสำปะหลัง	50
3.10	เครื่องสกัดไขมัน	51
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและแรงบิดของทรานสดิวเซอร์	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากทรานสดิวเซอร์กับแรงบิดทางทฤษฎี..... 55
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและอัตราเอนที่ความขึ้น ของกากมันสำปะหลังแตกต่างกัน..... 57
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเอนสูงสุดกับความขึ้นของกากมันสำปะหลัง ที่ได้รับอัตราเอนแตกต่างกัน..... 58
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความขึ้นของกากมันสำปะหลัง ที่ได้รับอัตราเอนแตกต่างกัน..... 59
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเอนสูงสุดกับอัตราเอนของกากมันสำปะหลัง ที่ความขึ้นของกากมันสำปะหลังแตกต่างกัน..... 60
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเอนของกากมันสำปะหลัง ที่ความขึ้นของกากมันสำปะหลังแตกต่างกัน..... 61
4.8	เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่พัฒนาขึ้นสำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง..... 63
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์กับความถี่ของมอเตอร์..... 64
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความขึ้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังกับ ความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งที่อุณหภูมิต่างกัน..... 66
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความขึ้นกับความเร็วรอบของลูกกลิ้งที่ระยะห่าง ต่าง ๆ กัน..... 69
4.12	ลักษณะกากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง..... 70
4.13	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วย เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ..... 72
4.14	อัตราการผลิตของกากมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ลูกกลิ้งคู่ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ..... 73
4.15	ความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ลูกกลิ้งคู่ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ..... 74
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการความขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ใน การอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งแตกต่างกัน..... 78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแตกต่างกัน.....	80
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของกากมันสำปะหลังกับเวลาในการอบแห้งเปรียบเทียบกับแบบจำลองของนิวตันที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแตกต่างกัน.....	83
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งที่ระยะลูกกลิ้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Page.....	84
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับ $1/T$ ($1/K$) เมื่ออบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง $130-150^{\circ}C$	86
ค.1 แบบเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	126
ค.2 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	127
ง.1 กากมันสำปะหลังออกจากกระบวนการผลิตแป้ง.....	129
ง.2 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อหาความชื้นของกากมันสำปะหลัง.....	129
ง.3 สร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	130
ง.4 ต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุม.....	130
ง.5 ปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง.....	131
ง.6 ปรับตั้งค่าอุณหภูมิอบแห้ง.....	131
ง.7 ปรับตั้งค่าความเร็วรอบของลูกกลิ้ง.....	132
ง.8 บ้อนกากมันสำปะหลังเข้าเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	132
ง.9 อบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	133
ง.10 กากมันสำปะหลังที่ได้ผ่านการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	133
ง.11 หาความชื้นกากมันสำปะหลังที่ได้ผ่านการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	134
ง.12 หาปริมาณเถ้าของกากมันสำปะหลัง.....	134

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (kg/kg (w.b))
M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg (d.b))
w	=	น้ำหนักของวัสดุเปียก ก่อนอบแห้ง (kg)
d	=	น้ำหนักของวัสดุแห้ง หลังอบแห้ง (kg)
\dot{Q}_x	=	อัตราการนำความร้อน (W)
k	=	ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
A	=	พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m^2)
ΔT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)
Δx	=	ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (m)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
M	=	น้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่บรรจุในทรงกระบอก (kg)
V	=	ปริมาตรของกากมันสำปะหลัง (m^3)
M	=	ความชื้นของกากมันสำปะหลัง (%w.b.)
w_i	=	น้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนเข้าสู่อบลมร้อน (g)
w_f	=	น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังเข้าสู่อบลมร้อน (g)
T	=	แรงบิด (N m)
F	=	แรงที่กระทำบนคาน (N)
L	=	ระยะตั้งฉากของแรงกระทำ (m)
τ_m	=	ความเค้นเฉือนสูงสุด (N/m^2)
T_m	=	แรงบิดสูงสุด (N m)
K	=	ค่าคงที่ใบ Vane (m^3)
η	=	ค่าความหนืด (Pa.s)
$\dot{\gamma}$	=	ค่าอัตราเฉือน (1/s)
N	=	ความเร็วรอบการหมุน (rpm)
k_s	=	ค่าคงที่ของใบ Vane ที่มีอัตราส่วน 2 : 1 มีค่าเท่ากับ (11.6/rev)
SEC	=	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

E	=	พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kW-h)
m_{water}	=	มวลของน้ำที่ระเหยออกจากกากมันสำปะหลัง (kg)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
T	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)
DC	=	ความสามารถในการทำแห้ง (g/min)
W_p	=	น้ำหนักกากมันสำปะหลังสด (g)
MR_t	=	อัตราส่วนความชื้น
W_t	=	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%db)
W_c	=	ความชื้นสมดุลของกากมันสำปะหลัง (%db)
W_o	=	ความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง (%db)
$MR_{\text{exp},i}$	=	อัตราส่วนความชื้นของการทดลอง
$MR_{\text{pred},i}$	=	ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
N	=	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์
D_{eff}	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
L	=	ความหนาของกากมันสำปะหลัง (m)
E_a	=	ค่าพลังงานกระตุ้น (KJ/mol)
T	=	อุณหภูมิของอากาศร้อน (K)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol K)
D_o	=	ค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส (m^2/s)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งประชาชนส่วนใหญ่มีอาชีพหรือดำรงอยู่ได้โดยมีความเกี่ยวพันกับการเกษตร พืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศเป็นสินค้าส่งออก เช่น ข้าว ยางพารา มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น มันสำปะหลังถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่ช่วยสร้างเม็ดเงินให้กับประเทศไทยได้ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะตลาดใหญ่ของมันสำปะหลังไทยคือประเทศจีนที่นิยมนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น อาหารสัตว์ แต่งรสอาหาร น้ำมันเอทานอล ทำให้มันสำปะหลังกลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไม่แพ้พืชชนิดอื่น โดยในฤดูเพาะปลูกปี 2562 ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูก 8.8 ล้านไร่ มีผลผลิตรวม 31 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) โดยพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่ามีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังมากที่สุดจำนวน 4.8 ล้านไร่ ให้ผลผลิต 17 ล้านตัน ส่งผลให้มีโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังเป็นจำนวนมากในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การแปรรูปมันสำปะหลังแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การแปรรูปเป็นมันเส้นหรือมันอัดเม็ด 2. การแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลัง ในกระบวนการแปรรูปแป้งมันสำปะหลังนั้นจะมีผลพลอยได้คือ เปลือกมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลัง โดยหัวมันสำปะหลังสดหนึ่งตันให้ปริมาณเปลือกมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลัง ประมาณ 30 kg และ 60 kg (เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, 2554) ในปัจจุบันเปลือกมันสำปะหลังถูกนำไปปลูกเห็ด เป็นส่วนผสมของดินปลูก และทำเป็นอาหารสัตว์ ส่วนกากมันสำปะหลังที่ออกมาจากโรงงานมีความชื้นสูง ประมาณ 70 - 80% (w.b.) (Olusegun and Ajiboye, 2010) เป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก เนื่องจากมีข้อเสียก็คือ มีกลิ่นเหม็นซึ่งรบกวนกับชุมชนที่อยู่รอบข้างซึ่งหากนำกากมันสำปะหลังนี้มาทำให้แห้งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล นำไปเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ หรือนำไปใช้ในเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้ ปัจจุบันมีการส่งออกกากมันสำปะหลัง จำนวน 176,559 ตัน คิดเป็นมูลค่า 744 ล้านบาท (สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง, 2561) โดยการทำให้แห้งของกากมันสำปะหลังในปัจจุบันนั้น พบว่ายังใช้การทำแห้งแบบตากลานปูนพึ่งพาพลังงานแสงอาทิตย์ในการทำแห้ง ทำให้การทำแห้งในช่วงฤดูฝนนั้นไม่สามารถทำได้ อีกทั้งการตากลานปูนยังใช้พื้นที่ในการตากค่อนข้างมาก ใช้ระยะเวลานานและส่งกลิ่นรบกวนชุมชนรอบข้าง

จากรายงานของนาฏชนก ปรางปรุ, วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, เกียรติศักดิ์ ใจโต (2556) ซึ่งได้ศึกษาการทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าที่กากมันสำปะหลัง ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 80% (w.b.) พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย 596.53 w/m^2 อุณหภูมิเฉลี่ย 37.43°C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 47.99% ใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง 14 วัน เห็นได้ว่าใช้ระยะเวลานานในการทำแห้ง และพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถควบคุมได้ ส่วนการทำแห้งกากมันสำปะหลัง โดยเครื่องอบแห้งพบว่ายังไม่เป็นที่แพร่หลายในเชิงพาณิชย์เนื่องจากประสบปัญหาจากลักษณะทางกายภาพของกากมันสำปะหลังและความไม่คุ้มค่าด้านต้นทุนพลังงานที่ใช้ในการลดความชื้น โดย เทวรัตน์ ตรีอำนาจ (2556) ได้ใช้ระบบอบแห้งแบบโรตารี นำกากมันสำปะหลังผ่านการลดความชื้นด้วยเครื่องด้วยเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์ จำนวน 40 kg เหลือความชื้น 68.5% (w.b.) จากนั้นลดความชื้นกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีจนเหลือความชื้น 13.8% (w.b.) ใช้เวลาในการอบแห้ง 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยพบว่ามีกากมันสำปะหลังอีก 38.77% เป็นกากมันสำปะหลังที่ต้องนำไปลดความชื้นเพิ่มเติม (เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และคณะ, 2554) ขณะที่การทำแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำ กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน มีกำลังการผลิตสูง และมีระยะเวลาในการทำแห้งสั้นจึงอาจเหมาะสมต่อการลงทุนและกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม (ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี, 2536)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแนวทางในการอบแห้งกากมันสำปะหลังต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับกระบวนการลดความชื้นกากมันสำปะหลัง
- 1.2.3 เพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ต้นแบบที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งกากมันสำปะหลังบนผิวลูกกลิ้งด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาระบวนการลดความชื้นกากมันสำปะหลังแบบลูกกลิ้งในระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale)

1.3.2 ใช้กากมันสำปะหลังจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมาในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งและประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรกลที่ใช้ในกระบวนการผลิตกากมันสำปะหลัง

1.4.2 ทราบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของกากมันสำปะหลังบนผิวของลูกกลิ้ง

1.4.3 ทราบสภาวะการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของกากมันสำปะหลัง การทำแห้ง เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างกระบวนการทำแห้ง ปัญหาการทำแห้งกากมันสำปะหลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

2.1 กากมันสำปะหลัง

อุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังก่อให้เกิดเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตคือ กากมันสำปะหลัง ซึ่งถือเป็นกากของเสียจากโรงงาน จึงมีการเปลี่ยนรูปกากของเสียให้เป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มคุณค่าของเสีย ซึ่งเป็นประโยชน์ในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายชนิดเช่น การนำไปเป็นส่วนประกอบของอาหารสัตว์ นำไปสกัดแป้งเพื่อการผลิตเอทานอล และนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น ในปัจจุบันกากมันสำปะหลังมีปริมาณและมูลค่าการส่งออก อยู่ที่ 176,599 ตัน และมูลค่า 744 ล้านบาทในช่วงเดือน มกราคม-มิถุนายน 2561 (สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง, 2561) ซึ่งถือได้ว่าเป็นสินค้าที่สร้างรายได้เข้าประเทศที่สูงและน่าสนใจอีกชนิดหนึ่ง กากมันสำปะหลังที่ออกมาจากโรงงานมีความชื้นสูง ประมาณ 70-80% (w.b.) (Olusegun and Ajiboye, 2010) และเป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก เนื่องจากมีข้อเสียก็คือ นำเสียดำง่าย ทำให้มีกลิ่นเหม็นรบกวนกับชุมชนที่อยู่รอบข้าง ซึ่งหากนำกากมันสำปะหลังนี้มาทำให้แห้ง สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ เชื้อเพลิงชีวมวล และนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้

2.1.1 ลักษณะของกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังจัดว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นของแข็งที่มีปริมาณมากที่สุดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยลักษณะทั่วไปของกากมันสำปะหลังเป็น สีขาวละเอียด มีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 80 (w.b.) องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตอยู่ร้อยละ 55-56 เซลลูโลสร้อยละ 10 เส้นใยร้อยละ 15 โปรตีนร้อยละ 1.5-5 และไขมันร้อยละ 0.1-4 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอยู่ในปริมาณต่ำ กากมันสำปะหลังมีแร่ธาตุ Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} และ Zn^{2+} อยู่ในปริมาณ 155, 40, 1100, 4 และ 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมแห้งตามลำดับ (ตีรณันท์ เอกสมทราเมษฐ์, 2551)

จากรายงานของ Balamurugan and Anbuselvi (2013) ได้ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและลักษณะทางชีวเคมีของกากมันสำปะหลัง พบว่าลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางชีวเคมีของกากมันสำปะหลังมีค่าแสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพของกากมันสำปะหลังต่อ 100 g

S. No.	Parameters	Pulp
1	pH	4.0
2	Turbidity	5.9
3	Temperature	28°C
4	Moisture	79.5
5	Ash content	13.70%
6	Titration acidity	0.08%

ตารางที่ 2.2 ลักษณะทางชีวเคมีของกากมันสำปะหลังต่อ 100 g

S. No.	Parameters expressed per 100g	Pulp
1	Starch	
2	Total sugars	18 mg
3	Reducing sugars	25 mg
4	Non Reducing sugars	6.6 mg
5	Proteins	6.8 mg
6	Ascorbic Acid mg	0.2 mg
7	Iron	1.9
8	Crude fibre %	1.60%
9	Crude fat %	0.05%

จากข้อมูลการทำวิจัยครั้งนี้ Balamurugan and Anbuselvi (2013) กล่าวว่ากากมันสำปะหลังสามารถใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ได้เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีโปรตีนเพียงพอที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบผลิตอาหารสัตว์ และกากมันสำปะหลังยังสามารถเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเอทานอลได้ ดังนั้นกากมันสำปะหลังจึงเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมได้

Kachenpukdee, Santerre, Ferruzzi, and Oonsivilai (2016) ได้ประเมินสมบัติทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ โดยนำกากมันสำปะหลังไปอบแห้งจากนั้นนำไปหาค่าสมบัติทางเคมีกายภาพ ปริมาณ แป้ง โปรตีน ความชื้น ไขมัน เถ้าและอื่น ๆ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.3 จากผลการศึกษาพบว่าอาหารที่เตรียมจากกากมันสำปะหลังมีประโยชน์สำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง

S. No.	Component	cassava pulp
1	Crude protein	2.60 ± 0.06
2	Ash	2.10 ± 0.03
3	Moisture	4.11 ± 0.23
4	Fat	0.13 ± 0.03
5	Starch	59.39 ± 0.02
6	Neutral detergent fiber (NDF)	31.67 ± 1.78
7	Acid detergent fiber (ADF)	28.21 ± 0.10
8	Acid detergent lignin (ADL)	2.44 ± 0.27
9	Cellulose	25.78 ± 0.16
10	Hemicellulose	3.46 ± 0.67

2.1.2 การนำกากมันสำปะหลังไปใช้ประโยชน์

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยการนำไปใช้ประโยชน์นั้นมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยเช่นนำไปหมักเป็นอาหารของโคนม หรือนำไปแปรรูปเป็นผงเพื่อเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ นำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อสกัดเป็นพลังงานทดแทน นำไปอัดแท่งเพื่อเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

Suksombat, Lounglawan, and Noosen (2006) ได้ศึกษาการนำกากมันสำปะหลังผสมในอาหาร โคนมในอัตราส่วน 35% 40% และ 45% ตามลำดับ จากนั้นทำการตรวจสอบประสิทธิภาพการให้นมของโคนม และน้ำหนักตัวของโคนมเปรียบเทียบกับวัวนมที่เลี้ยงด้วยสภาวะควบคุม พบว่าผลผลิตน้ำนม องค์ประกอบของน้ำนมและการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวไม่ได้รับผลกระทบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยผลการศึกษานี้สามารถใช้กากมันสำปะหลังเป็นส่วนผสมได้ 45% ของอาหารโคนม

Khempaka, Molee, and Guillaume (2009) ได้ศึกษาการนำกากมันสำปะหลังแห้งมาทดแทนเป็นส่วนผสมในอาหารไก่เนื้อ โดยนำกากมันสำปะหลังลดความชื้นด้วยวิธีตากแห้งเหลือความชื้นเฉลี่ย 10% (w.b.) จากนั้นนำไปผ่านตะแกรงขนาด 1 mm จากนั้นนำไปเป็นส่วนผสมอาหารไก่เนื้อ โดยมีอัตราส่วนผสมกากมันสำปะหลังอยู่ที่ 4 8 12 และ 16% จากนั้นทำการประเมินน้ำหนักไก่เนื้อ การบริโภคอาหาร อวัยวะการย่อยอาหาร น้ำหนักต่อความยาว และการย่อยได้ของธาตุอาหารในไก่เนื้อ พบว่าการบริโภคอาหารของไก่เนื้อส่งผลลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่อัตราส่วนผสมกากมันสำปะหลังที่ 12 และ 16% ส่วนอัตราส่วนที่ 4 และ 8% ไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ต่อน้ำหนักตัวและการบริโภคของไก่เนื้อ

Kosugi et al. (2009) ได้ศึกษาการนำกากมันสำปะหลังหมักโดยใช้ยีสต์ในการทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตเอทานอล ทำการหมักที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังที่ 5 10 20 และ 30% พบว่าที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังมีผลต่อผลผลิตน้ำตาลกลูโคส โดยที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังที่ 5% ให้น้ำตาลกลูโคสสูงสุด และลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการย่อยสลายค่าที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลังสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของเอนไซม์ไม่เพียงพอต่อการปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของสารตั้งต้น

Tanpaiboonkul and Budnumpetch (2016) ได้ศึกษาวิธีการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่ง อัดเม็ด ต้นทุนต่อหน่วย จากผักตบชวา โดยใช้แป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วนคือ 3:1 3:2 3:3 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ตามลำดับและเมื่อใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วน 3:5 3:6 3:7 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ การศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาที่มีกากมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วน 3:3 มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดร้อยละ 73.3 และมีค่าความหนาแน่นสูงสุด 0.443 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวาที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วน 3:3 มีค่าความร้อนสูงสุดคือ 3,831.98 แคลอรี/กรัม และมีค่าดัชนีการแตก่วนของเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 0.90-0.99 เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริงพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวาที่ใช้แป้งมันเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วน 3:3 ให้อุณหภูมิสูงสุด 89.2 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 60

นาที่แรก และเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตของเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวาที่ใช้กากมันสำปะหลังเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 3:1 มีต้นทุนการผลิตต่ำสุดคือ 3.08 บาท/กิโลกรัม

Bui et al. (2018) ได้ศึกษาการอัดเม็ดกากมันสำปะหลังเพื่อเป็นอาหารสัตว์โดยใช้ อัตราส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลังในการอัดเม็ด พบว่าที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลังที่ 1 : 10 – 1 : 5 สามารถอัดเม็ดขึ้นรูปได้ตามคุณสมบัติ คือมีความหนาแน่นของเม็ด 700 kg/m³ ความแข็งแรงของเม็ดแตกหักมีค่ามากกว่า 2 kg ใช้เวลาในการแตกตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ 116 นาที มีความชื้นของเม็ดอยู่ที่ 13% (w.b) หลังจากผ่านการอบแห้ง 5-5.5 ชั่วโมง

จากรายงานการศึกษาข้างต้นพบว่ากากมันสำปะหลังที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแป้งมันสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่าง ๆ มากมายแต่ด้วยลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ลักษณะชื้นเหนียว เป็นของแข็งอนุภาคเล็ก ๆ จับตัวกันเป็นก้อน มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลักทำให้มีความชื้นสูง มีแป้ง โปรตีน ไขมัน อื่น ๆ เป็นส่วนประกอบ จึงทำให้ยากต่อการเก็บรักษา ขนส่ง และการนำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องนำกากมันสำปะหลังไปลดความชื้นเพื่อที่ นำไปใช้ประโยชน์ เช่น เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ นำไปอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล นำเป็นเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล เพื่อใช้ของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกทั้งหากไม่ได้จัดการกากมันสำปะหลังอย่างเหมาะสม ทำให้เกิดปัญหาเน่าเสียของกากมันสำปะหลัง ส่งกลิ่นรบกวนต่อชุมชนรอบข้าง และมีค่าจัดการของเสียทิ้งจากโรงงาน ดังนั้นเพื่อใช้กากมันสำปะหลังให้เกิดประโยชน์ ง่ายต่อการขนส่ง และเก็บรักษากากมันสำปะหลัง จำเป็นต้องลดความชื้นของกากมันสำปะหลังให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย 14% (w.b.) โดยการทำให้กากมันสำปะหลังในปัจจุบันยังใช้วิธีการตากบนพื้นคอนกรีตขนาดใหญ่พึ่งพาพลังงานแสงอาทิตย์ ในการทำให้แห้ง ทำให้การทำแห้งในช่วงฤดูฝนนั้นไม่สามารถทำได้ อีกทั้งการตากลานปูนยังใช้พื้นที่ในการตากค่อนข้างมาก ใช้ระยะเวลาและส่งกลิ่นรบกวนชุมชนรอบข้าง ทำให้เกิดปัญหาในการจัดการ การพัฒนาเครื่องอบแห้งเพื่อนำมาลดความชื้นกากมันสำปะหลังก่อให้เกิดศักยภาพในการนำกากมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุ (moisture content) เป็นดัชนีที่ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือมวลของวัสดุแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้สองรูปแบบ กล่าวคือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis moisture content) และความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis

moisture content) โดยความชื้นทั้งสองรูปแบบสามารถหาได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ ความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w) ใช้น้ำหนักของวัสดุที่ชื้นเป็นฐานในการคำนวณ

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) ใช้น้ำหนักของวัสดุที่แห้งเป็นฐานในการคำนวณ

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ

M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.)

M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.)

w = น้ำหนักของวัสดุเปียก ก่อนอบแห้ง (kg)

d = น้ำหนักของวัสดุแห้ง หลังอบแห้ง (kg)

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งและความชื้นมาตรฐานเปียกแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.3)

$$M_w = \left(\frac{M_d}{1+M_d} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

การใช้ความชื้นเพื่อการอ้างอิงในการทดลอง ใช้ความชื้นมาตรฐานแห้งมากกว่ามาตรฐานเปียก เนื่องจากการอ้างอิงโดยใช้มาตรฐานเปียกนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากมีความชื้นของวัสดุ (ซึ่งเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาระหว่างการอบแห้ง) เข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณอย่างไรก็ตามในการอ้างอิงทั่ว ๆ ไปการใช้ค่าความชื้นมาตรฐานเปียกน่าจะสื่อความหมายให้เข้าใจได้ง่ายกว่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, 2552)

2.3 การหาความชื้นในวัสดุเกษตรและอาหาร

การหาความชื้นนั้นสามารถหาได้ 2 วิธีคือ วิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม วิธีทางตรงใช้ตู้อบในการหาความชื้นอาจเป็นตู้อบไล่ความชื้น (oven) ซึ่งอาจเป็นตู้อบไล่ความชื้นปกติ หรือเป็นตู้อบสูญญากาศก็ได้ ตัวอย่างการหาความชื้นในวัสดุโดยใช้ตู้อบมีดังนี้ (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540) เช่น

ผลไม้แห้งอบที่ 70°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงในตู้อบสูญญากาศ
นมผงแห้ง อบที่ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงในตู้อบสูญญากาศ
กากน้ำตาล อบที่ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในตู้อบสูญญากาศ
เมล็ดพันธุ์ อบที่ 130°C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงในตู้อบไล่ความชื้นปกติ
หรือ อบที่ 100°C เป็นเวลา 72-96 ชั่วโมงในตู้อบไล่ความชื้นปกติดังรูป 2.1

อย่างไรก็ตาม ตัวเลขดังกล่าวเป็นเพียงข้อเสนอแนะเท่านั้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาความชื้นโดยการอบ อาจสังเกตได้จากน้ำหนักแห้งของวัสดุที่เปลี่ยนไป หากพบว่าน้ำหนักของวัสดุยังมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้ แสดงว่าความชื้นในอาหารยังถูกกำจัดออกไปได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรอบต่อไปจนกระทั่งน้ำหนักวัสดุที่อบนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง การหาความชื้นของอาหารบางชนิดสามารถหารายละเอียดอ้างอิงเพิ่มเติมได้จากมาตรฐานของ Association of Official Agricultural Chemists (AOAC, 2000)



รูปที่ 2.1 ตู้อบ

มาตรวัดความชื้น (moisture content meter) เป็นวิธีวัดทางตรง ดังรูป 2.2 สามารถหาความชื้นได้โดยการอบแต่ใช้ระยะเวลาในการอบสั้นกว่าและใช้ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า โดยใช้หลักการอบไล่ความชื้น โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุตัวอย่าง การให้ความร้อนอาจทำได้โดยการใช้ขดลวดกำเนิดความร้อนหรือหลอดไฟให้ความร้อนแบบอินฟราเรด เครื่องวัดความชื้นนี้ประกอบไปด้วยหลอดไฟอินฟราเรดเพื่อให้ความร้อนและเครื่องชั่งอยู่ในเครื่องเดียวกัน ในขณะที่หลอดอินฟราเรดให้ความร้อนแก่อาหาร น้ำระเหยออกไป ในขณะที่เดียวกันเครื่องชั่ง อ่านบันทึกค่ามวลของอาหารที่เปลี่ยนไปเทียบกับมวลเริ่มต้น ทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งมวลไม่มีการเปลี่ยนแปลง เครื่องคำนวณค่าความชื้นสุดท้าย



รูปที่ 2.2 เครื่องวัดความชื้นด้วยระบบอินฟราเรด FD-610

วิธีทางอ้อมโดยใช้หลักการค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุเช่น (Dole Moisture Tester) เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์แบบกระเป๋าทั่ว เหมาะใช้ในงานภาคสนาม สามารถอ่านค่าความชื้นของเมล็ดข้าวโพด, ถั่วเหลือง, ข้าวบาร์เลย์, ข้าวสาลี, ข้าวเปลือก และกาแฟ ใช้ระบบการตรวจวัดความชื้นด้วยวิธี capacitance testing สามารถวัดความชื้นได้ในช่วง 6 - 35% โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดพันธุ์

2.4 การอบแห้ง

การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะอยู่ในสถานะของแข็ง น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัสดุนั้นเพื่อดึงน้ำออกมา วัสดุจะแห้งได้มาก-น้อยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุด้วย ในการอบ เมื่อทำให้ของเหลวในวัตถุดิบระเหยเป็นไอ จะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีสัดส่วนของของเหลวต่ำลง ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันไป เช่น ชิน แป้ง เกล็ด หรือ ผง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการทำแห้งที่เลือกใช้ โดยทั่วไปกระบวนการอบแห้งมักใช้อากาศเป็นตัวกลาง ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันกับการถ่ายเทความชื้นจากวัสดุไปยังอากาศโดยรอบ ความร้อนที่ได้รับจากอากาศส่วนใหญ่ถูกใช้ในการทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ ซึ่งอัตราการระเหยของน้ำหรืออัตราการอบแห้งของวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง

ในกรณีของวัสดุทางการเกษตรซึ่งส่วนใหญ่มีความชื้นค่อนข้างสูงทั้งขณะเก็บเกี่ยวและหลังเก็บเกี่ยวส่งผลให้ไม่สามารถเก็บรักษาผลิตผลที่ได้เป็นระยะเวลานาน เพราะผลิตผลอาจเกิดความเสียหายจากเชื้อราที่เกิดจากความชื้นในตัวของตัวเอง การอบแห้งจึงเป็นกระบวนการหนึ่ง ที่ช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลที่ได้เป็นระยะเวลานานขึ้นเนื่องจากการอบแห้งเป็นการลดปริมาณน้ำในอาหารเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์หรือชะลอปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางชีวเคมีที่เป็นสาเหตุให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้มีน้ำหนักเบาทำให้สะดวกต่อการขนส่ง

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้งคือสมบัติและประเภทของความชื้นในวัสดุ โดยปกติความชื้นวัสดุประกอบไปด้วย ความชื้นรอบผิววัสดุและความชื้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งความชื้นรอบผิววัสดุเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่าย ส่วนความชื้นในเนื้อวัสดุเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ยาก นอกจากนี้ยังมีความชื้นของบรรยากาศ ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุสมดุลกับความชื้นของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

อัตราการอบแห้ง (drying rate) เป็นตัวแปรที่ใช้บอกถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ด้วยการแสดงค่าความชื้นที่สามารถระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมงหรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมง ดังรูปที่ 2.3 โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ มีอัตราการอบแห้งเกิดขึ้น 3 ช่วง ดังนี้

2.4.1 ช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น (preheating drying)

เป็นการอบแห้งในช่วงที่เริ่มให้ความร้อนแก่วัสดุ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุและน้ำในวัสดุให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศร้อน ซึ่งอัตราการให้ความร้อนที่สูงจึงทำให้การอบแห้งในช่วงนี้มีระยะเวลาล้าน และเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงการอบแห้งต่อไปซึ่งมีระยะเวลานานกว่า จึงอาจไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการอบแห้งในช่วงนี้ก็ได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ช่วง A-B

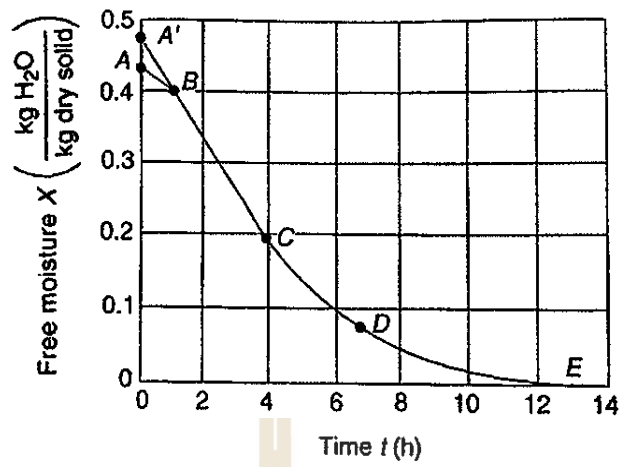
2.4.2 ช่วงการอบแห้งคงที่ (constant rate drying)

เป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นสูง ความชื้นจึงเดินทางมาสู่บริเวณผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่ถ่ายจากลมร้อนมาที่ผิว ส่วนใหญ่เป็นความชื้นรอบผิววัสดุหรือความชื้นอิสระ (unbound moisture) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ช่วง B-C

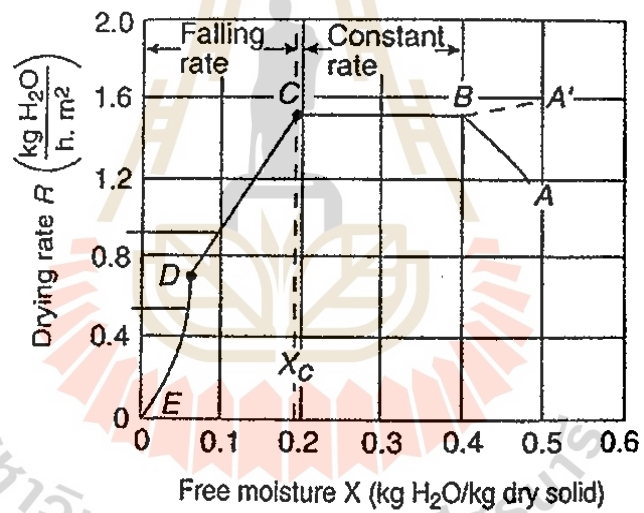
2.4.3 ช่วงการอบแห้งลดลง (falling rate drying)

เป็นการอบแห้งในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลง เมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทัน อัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาที่ลด ส่วนใหญ่เป็นความชื้นในเนื้อวัสดุหรือความชื้นเกาะติด (bound moisture) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ช่วง C-D





(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของการอบแห้ง (Heldman and Lund, 2007)

2.5 การอบแห้งกากมันสำปะหลัง

การทำแห้งกากมันสำปะหลัง เป็นการทำแห้งโดยใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อกำจัดปริมาณน้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ภายในกากมันสำปะหลังให้ระเหยออกไปด้วยการใช้หลักการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ซึ่งความร้อนที่ใช้อาศัยแหล่งความร้อนจากภายนอก จากนั้นถ่ายเทความร้อนเข้าสู่กากมันสำปะหลัง และความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ปริมาณน้ำส่วนใหญ่ของกากมันสำปะหลังทั้งหมดเกิดการระเหยออกมา ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะแห้งตามต้องการ ขณะที่การทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

การอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ นาฏชนก ปรางปรุ และคณะ (2556) ได้ศึกษาการทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ความหนาของกากมันสำปะหลัง 2.4 และ 6 cm การพลิกกลับกองและไม่พลิกกลับกอง โดยทำแห้งกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 81.10% (w.b.) พลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ย 596.53 W/m² อุณหภูมิเฉลี่ย 37.43°C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 47.99% และใช้ระยะเวลาในการทำแห้งทั้งหมด 14 วัน พบว่า ทั้งความหนาและการพลิกกลับกองมีผลต่อความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลัง โดยการทำแห้งที่ความหนา 2 cm สามารถลดความชื้นของกากมันสำปะหลังลงเหลือความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 9.21% (w.b.) และไม่มีเชื้อราเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านการพลิกกลับกอง พบว่า ที่ความหนาเดียวกันความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเมื่อมีการพลิกกลับกอง ซึ่งผลจากการประเมินความสามารถในการทำแห้ง พบว่าการทำแห้งที่ความหนา 2 cm และ ไม่มีการพลิกกลับกองเป็นสภาวะที่มีความสามารถในการทำแห้งสูงสุด จะเห็นได้ว่าใช้เวลานานในการทำแห้งใช้พื้นที่ในการทำแห้งสูงและพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถควบคุมได้

วิเชียร ดวงสีเสน (2555) ได้ศึกษาอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิการอบแห้งที่ 100 และ 120°C ความเร็วในการหมุน 2, 4 และ 6 rpm พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ อุณหภูมิ 100°C ความเร็วรอบในการหมุนที่ 6 rpm ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำน้อยกว่าสภาวะการอบแห้งอื่น คือ 5.65 MJ/kg-water และใช้เวลาในการอบแห้ง 1.5 ชั่วโมง อัตราการอบแห้ง 7.68 kg dry solid/hr กากมันสำปะหลังที่ได้มีสองส่วนคือส่วนที่ร่วนผ่านรูตะแกรงของถังอบทรงกระบอก 48.14% ของถังอบความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 110.97% (d.b.) และส่วนที่ค้างภายในตะแกรงของถังอบทรงกระบอก 51.83% ความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 13.90% (d.b.) เนื่องจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านรูตะแกรงของถังอบทรงกระบอกยังมีความชื้นสูงอยู่จึงจำเป็นต้องนำมาลดความชื้นอีกครั้ง

สุระ ตันติ, ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์, โชติชวาล ชัยธวัชวิบูลย์, และอนุชา สมพงษ์ (2553) ได้ศึกษาคุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง โดยทดสอบการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งที่ 80 90 และ 100°C ความเร็วลมร้อนที่ 8.9 และ 10 m/s ปริมาตรห้องอบแห้ง 0.87 m³ น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ทำการทดสอบ 500 g มีความชื้นเริ่มต้นที่ 78% (w.b.) จากการทดสอบพบว่า ความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเมื่อเวลาการอบแห้ง อุณหภูมิ และความเร็วลมเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกากมันสำปะหลังในการทดลองนี้คือ ที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วลม 8 m/s ทำให้กากมันสำปะหลังมีอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.07 ความชื้น 7.69% (w.b.) ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 2 hr เมื่อความชื้นกากมันสำปะหลังลดลง ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สูงขึ้น

กลวัชร ทิมินกุล และคณะ (2558) ได้ศึกษาและออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังแบบลูกกลิ้งคู่ โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิที่ผิวไม่ต่ำกว่า 500°C ความเร็วรอบในการหมุนคือ 2 rpm ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 1-2 mm ความชื้นกากมันเจ็ลลี่เริ่มต้น 80% (w.b.) พบว่ามีความสามารถในการลดความชื้นกากมันสำปะหลังได้ 24 kg/hr มีอัตราการสิ้นเปลืองก๊าซแอลพีจี 0.8 kg/hr จะเห็นว่าการลดความชื้นได้ปริมาณค่อนข้างต่ำแต่สามารถขยายสัดส่วนให้ใหญ่ขึ้น และใช้แหล่งเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนถูกกว่าก๊าซแอลพีจี

Charmongkolpradit and Luampon (2017) ได้ศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังแบบชั้นบาง ในการอบแห้งใช้กากมันสำปะหลังที่ความชื้นเริ่มต้น 80% (w.b.) อบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C จากนั้นทำการบันทึกน้ำหนักของกากมันสำปะหลังทุก ๆ 20 นาที จนกระทั่งมวลของกากมันสำปะหลังคงที่ จากการทดลองพบว่าความชื้นลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งและอุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น ได้สมการการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 50-70°C

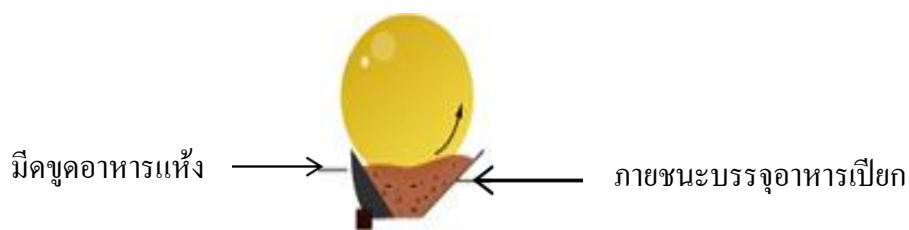
จากรายงานข้างต้นพบว่า การอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งยังไม่เป็นที่นิยมในเชิงพาณิชย์เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีความชื้นสูง และลักษณะทางกายภาพของกากมันสำปะหลังที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กเกาะกันเป็นกลุ่มทำให้มีลักษณะชื้นเหนียว และเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามลักษณะของภาชนะบรรจุ ทำให้มีรูปร่างไม่แน่นอน ยากต่อการอบแห้งจากรายงานของ วิเชียร ดวงสีเสน (2555) พบว่าการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี กากมันสำปะหลังที่จับตัวกันเป็นก้อน ทำให้ตรงกลางของกากมันสำปะหลังไม่สามารถลดความชื้นได้ถึงระยะปลอดภัยต่อการเก็บรักษาได้ และการอบแห้งแบบชั้นบางของ Charmongkolpradit and Luampon (2017) สามารถอบแห้งกากมันสำปะหลังได้ แต่ต้องเตรียมกากมันสำปะหลังให้อยู่ในลักษณะชั้นบาง ใช้พื้นที่ในการวางตัวอย่างอบแห้งจำนวนมาก และตู้อบมีขนาดใหญ่ต่อการทำแห้งกากมันสำปะหลัง ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจในแนวทางในการอบแห้ง

กากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีลักษณะชั้นหนืด สามารถป้อนกากมันสำปะหลังต่อเนื่องในการอบแห้ง และเป็นการแก้ปัญหาลักษณะทางกายภาพของกากมันสำปะหลังที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ให้อยู่ในรูปของแผ่นบางได้

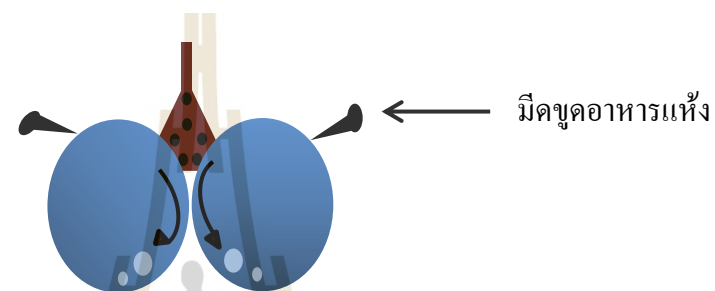
2.6 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเหมาะสำหรับที่นำมาใช้ทำแห้งอาหารที่เป็นลักษณะเหมือนแป้งเปียก โดยผิวโลหะด้านนอกของลูกกลิ้งที่ร้อนสัมผัสอาหารในถังป้อนขึ้นมาเป็นฟิล์มบาง พร้อมกับหมุนรอบตัวเอง เมื่อหมุนครบรอบอาหารแห้งพอดีและถูกขูดออกจากผิวโลหะร้อนก่อนที่ลูกกลิ้งหมุนกลับไปสัมผัสอาหารในถังป้อนใหม่ อาหารแห้งที่ถูกขูดออกจากผิวลูกกลิ้งมีลักษณะเป็นเกล็ดหรือผงหยาบ ตัวอย่างอาหาร เช่น มันฝรั่งผง อาหารผง เครื่องปรุงผง เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่นิยมใช้กันทั่วไปประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกจำนวน 1-2 ลูก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด ซึ่งลูกกลิ้งนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่ทำด้วยโลหะจำพวกสแตนเลส สามารถนำความร้อนได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยากับอาหาร อีกทั้งภายในทรงกระบอกกลวงก็มีแหล่งบรรจุกความร้อนเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการให้ความร้อนแก่อาหารได้แก่ ไอน้ำ น้ำเดือด น้ำมัน ไฟฟ้า เป็นต้น ขณะที่ลูกกลิ้งติดตั้งอยู่บนฐานที่แข็งแรงและสามารถทำให้ลูกกลิ้งหมุนได้รอบแกนตามแนวอน นอกจากนี้ยังมีใบมีดที่ทำจากสแตนเลสถูกยึดติดไว้กับฐานเพื่อใช้สำหรับขูดผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแล้วออกจากเครื่อง โดยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งนี้สามารถจำแนกออกตามจำนวนและทิศทางการหมุนของลูกกลิ้งได้ เป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

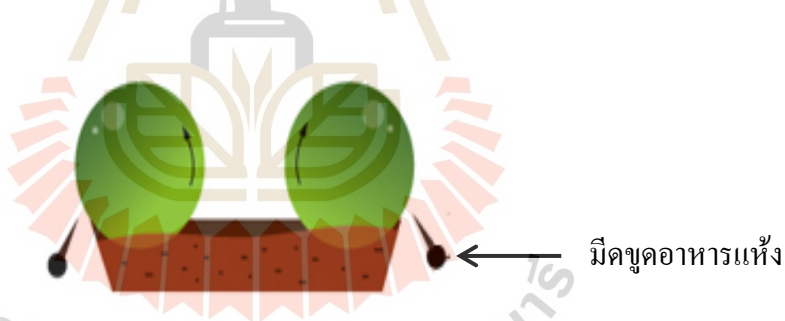
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก) single drum with dip feed



(ข) double drum with nip feed



(ค) twin drum with dip

รูปที่ 2.4 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งประเภทต่างๆ (นฤดี พงศ์กิจจิ๋ว, 2542)

2.6.1 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว (Single drum dryer)

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งประเภทนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกจำนวนหนึ่งลูก โดยสารละลายอาหารที่นำมาอบแห้งถูกป้อนจากด้านล่างด้วยการป้อน 3 แบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่อง ได้แก่ การป้อนแบบจุ่ม (dip feed) ดังรูป (2.4 ก) ซึ่งเป็นการป้อนด้วยการจุ่มลูกกลิ้งลงในรางที่บรรจุสารละลายอาหารไว้หรืออาจเป็นการป้อนแบบพ่น (splash feed) ซึ่งเป็นการป้อนด้วยการพ่นสารละลายอาหารลงไปบนผนังของลูกกลิ้งโดยตรง หรืออาจเป็นการป้อนแบบรีด (transfer roll) ซึ่งเป็นการป้อนด้วยการใช้ลูกรีดทำการรีดสารละลายอาหารลงไปบนผนังของลูกกลิ้ง และเมื่อลูกกลิ้งหมุนสารละลายอาหารก็ติดไปกับผนังของลูกกลิ้งในลักษณะที่เป็นแผ่นฟิล์มบาง จากนั้นลูกกลิ้งหมุนต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสารละลายอาหารแห้งลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ถูกปาดออกด้วยใบมีดที่ติดไว้บริเวณด้านข้างของลูกกลิ้ง

2.6.2 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (Double drum dryer)

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งประเภทนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกจำนวนสองลูกและลูกกลิ้งทั้งสองลูกหมุนเข้าหากัน โดยสารละลายอาหารที่นำมาอบแห้งจะถูกป้อนลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งด้วยการป้อนแบบปล้อย (nip feed) ดังรูป (2.4 ข) ซึ่งเป็นการป้อนด้วยการปล้อยสารละลายอาหารลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง จากนั้นลูกกลิ้งทั้งสองหมุนเข้าหากันเพื่อรีดสารละลายอาหารให้มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ขณะที่ลูกกลิ้งหมุนสารละลายอาหารก็จะติดไปกับผนังของลูกกลิ้ง โดยลูกกลิ้งหมุนต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสารละลายอาหารแห้งลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ถูกปาดออกด้วยใบมีดที่ติดไว้บริเวณด้านข้างของลูกกลิ้งทั้งสองข้าง

2.6.3 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่หมุนออกจากกัน (Twin drum dryer)

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งประเภทนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกจำนวนสองลูกและลูกกลิ้งทั้งสองลูกหมุนออกจากกัน โดยสารละลายอาหารที่นำมาอบแห้งถูกป้อนลงในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งด้วยการป้อนแบบจุ่ม (dip feed) ดังรูป (2.4 ค) ซึ่งเป็นการป้อนด้วยการจุ่มลูกกลิ้งลงในรางที่บรรจุสารละลายอาหารไว้ หรืออาจเป็นการป้อนแบบพ่น (splash feed) ซึ่งเป็นการป้อนด้วยการพ่นสารละลายอาหารลงไปบนผนังของลูกกลิ้งโดยตรง จากนั้นลูกกลิ้งทั้งสองหมุนออกจากกันเพื่อรีดสารละลายอาหารให้มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ขณะที่ลูกกลิ้งหมุนสารละลายอาหารก็ติดไปกับผนังของลูกกลิ้ง โดยลูกกลิ้งหมุนต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสารละลายอาหารแห้งลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ถูกปาดออกด้วยใบมีดที่ติดไว้บริเวณด้านข้างของลูกกลิ้งทั้งสองข้าง

จากการศึกษาเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่หมุนเข้าหากัน เพราะง่ายต่อการป้อนกากมันสำปะหลังแบบต่อเนื่องและเป็นการกำหนดรูปร่างของกากมันสำปะหลังให้มีรูปร่างแบบเดียวกันก่อนเข้ากระบวนการอบแห้ง โดยป้อนกากมันสำปะหลัง

แบบปล่อยตกลงช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง จากนั้นกากมันสำปะหลังจะเกาะติดไปกับผิวลูกกลิ้งเป็นแผ่นบางตามระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ขณะลูกกลิ้งกำลังหมุนกากมันสำปะหลังได้รับความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งเพื่อถ่ายเทความร้อนขึ้นออกจากกากมันสำปะหลัง โดยลูกกลิ้งหมุนต่อไป จนกระทั่งกากมันสำปะหลังมีความชื้นลดลง กากมันสำปะหลังที่ลดความชื้นแล้วถูกขูดออกด้วยใบมีดขูดด้านข้างของลูกกลิ้ง

2.7 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นการศึกษาอัตราการถ่ายเทพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างระบบสองระบบหรือระหว่างระบบหนึ่งและสิ่งแวดล้อม เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานรูปอื่น เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบทำให้พลังงานในรูปความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบได้แก่ การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545)

2.7.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อน หมายถึงการส่งถ่ายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูง ไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งกับอีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่องกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็น ของแข็งของเหลว และก๊าซ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแบบการนำความร้อน กำหนดจากกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law)

กฎของฟูรีเยร์ กล่าวว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดทิศทางหนึ่งความร้อนที่ต้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (Q_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นปรากฏโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ต้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (A) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว (dT/dx)

สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) อุณหภูมิในตัวกลาง $T = T(x)$ จากกฎของฟูรีเยร์ (Nag, 2002)

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

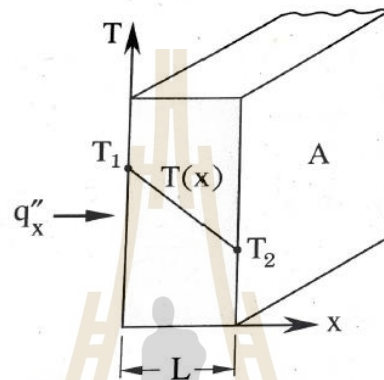
โดยที่ค่า \dot{Q}_x คืออัตราการนำความร้อน (W)

K คือค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) (W/m°C)

A คือพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m²)

dT คือความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)

dx คือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (m)



รูปที่ 2.5 การนำความร้อนผ่านตัวกลางใน 1 มิติพิกัด x (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545)

โดยค่า k คือค่าคงที่สัดส่วน ซึ่งเรียกว่า ค่าสภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของตัวกลาง มีหน่วยเป็น (W/m K)

ฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จาก

$$q_x'' = \frac{\dot{Q}_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

ในสมการ (2.4) และ (2.5) ถ้าอุณหภูมิของตัวกลางลดลงตามทิศทาง +x พบว่าค่าของ dT/dx เป็นลบ ดังนั้นถ้า \dot{Q}_x หรือ q_x'' มีเครื่องหมายบวก แสดงว่า \dot{Q}_x หรือ q_x'' มีทิศทางการไหลในทิศ +x ภายใต้สภาวะคงตัวและตัวกลางมี k เป็นค่าคงที่ อุณหภูมิ T(x) เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นดังรูปที่ 2.5 ดังนั้น

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{-(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.6)$$

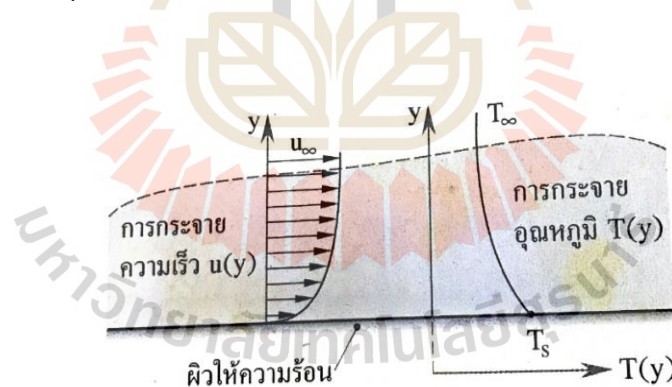
ดังนั้น

$$q_x'' = \frac{k(T_1 - T_2)}{L} = \frac{k\Delta T}{L} \quad (2.7)$$

โดยที่ q_x'' คือฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลาง ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)

2.7.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อน หมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งกับของไหล ผลการเคลื่อนไหวของของไหลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัม ซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของแข็งนั้น ($h, \text{W/m}^2 \text{ K}$) พลังงานความร้อนถูกโอนถ่ายเป็นผลมาจากการแพร่ (diffusion) ของโมเลกุลและผลจากการเคลื่อนไหวไปทั้งปริมาตรของของไหลดังรูปที่ 2.6

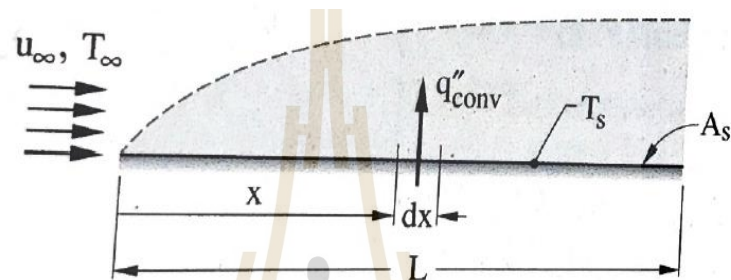


รูปที่ 2.6 การกระจายความเร็วและอุณหภูมิของของไหลขณะเกิดการพาความร้อนบริเวณใกล้ผิวให้ความร้อน (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545)

การพาความร้อนจำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวยของของไหลเป็นผลของแรงลอยตัวซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เกิดจากมีผลต่างของอุณหภูมิของของไหลใน 2 บริเวณ

2) การพาความร้อนโดยบังคับ (forced convection) กล่าวถึงการเคลื่อนไหวยของของไหลที่เป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอกเช่น เครื่องสูบลม เครื่องเป่าลม (blower) ฯลฯ



รูปที่ 2.7 การพาความร้อนในชั้นขีดผิวความร้อนและชั้นขีดผิวความเร็ว (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545)

พิจารณาการพาความร้อนจากผิวของแข็งพื้นที่ A_s อุณหภูมิผิว T_s ขณะของไหลไหลผ่านด้วยความเร็ว U_∞ และอุณหภูมิ T_∞ คงที่ ฟลักซ์ความร้อนเฉพาะที่คำนวณเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) แสดงดังรูปที่ 2.7

$$q''_{\text{conv}} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$) ดังนั้นคำนวณอัตราการพาความร้อนทั้งหมดบนพื้นผิว A_s จาก

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \int_{A_s} q''_{\text{conv}} dA_s = (T_s - T_\infty) \int h dA_s \quad (2.9)$$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h_m A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

โดยที่ \dot{Q}_{conv} คือฟลักซ์ความร้อน (W)
 h_m คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (average Convection coefficient) สำหรับแผ่นระนาบ (flat plate) ยาว L พบว่า

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h \, dx \quad (2.11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งานพิจารณาจำแนกตามประเภทการพาความร้อนแสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงใช้งาน

ชนิดของการพาความร้อน	ค่าสัมประสิทธิ์ ($W/m^2 K$)
การพาความร้อนตามธรรมชาติ	5-25
การพาความร้อนโดยบังคับ	
ก๊าซ	25-250
ของเหลว	50-20,000
การพาขณะเปลี่ยนแปลงเฟส (เดือดและควบแน่น)	2,500-100,000

ที่มา (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545)

2.7.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีความร้อน หมายถึงการถ่ายเทความร้อนจากผิวตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกผิวตัวกลางหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งถ่ายในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electro magnetic wave) หรือในรูปของโฟตอนโดยไม่ต้องอาศัยวัสดุตัวกลาง การแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถเกิดในสุญญากาศได้

ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง คำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q_{rad}'' = \sigma T_s^4 \quad (2.12)$$

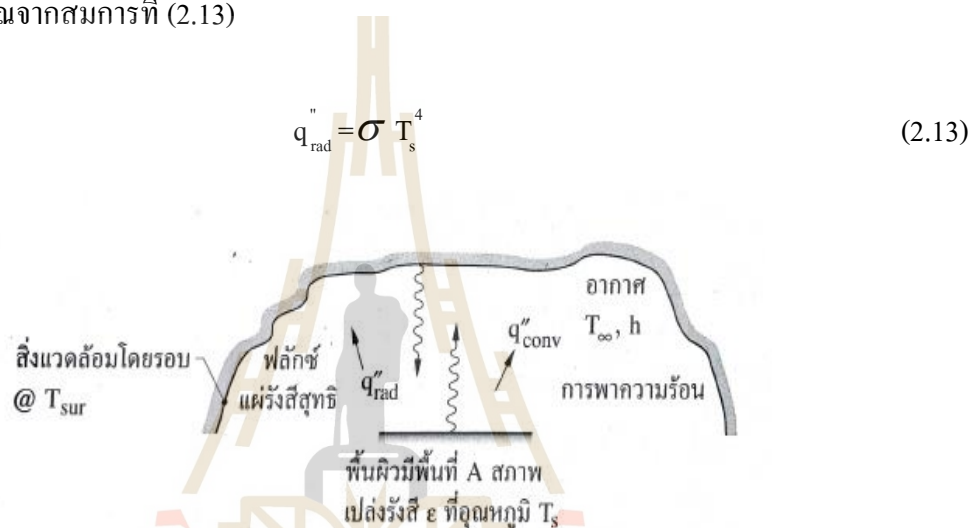
โดยที่ q''_{rad} คือฟลักซ์ของการแผ่รังสี (W/m^2)

T_s คืออุณหภูมิผิวแผ่รังสีในหน่วยของสัทัมบูรณ์ (K)

σ คือค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ และมีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8}

$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$

สมการ (2.12) ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (ideal radiator) หรือวัตถุดำ (black body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (real surface) ฟลักซ์แผ่รังสีน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพเปล่งรังสี (emissivity) ของพื้นผิวนั้น (ϵ) ด้วยฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริงแสดงดังรูปที่ 2.8 คำนวณจากสมการที่ (2.13)



รูปที่ 2.8 การแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิวหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545)

พิจารณาการแผ่รังสีแลกเปลี่ยนกันระหว่างพื้นผิว A อุณหภูมิ T_s มีสภาพเปล่งรังสี ϵ กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ T_{sur} อัตราการแผ่รังสีสุทธิบนพื้นผิว A คือ

$$q''_{\text{net}} = \frac{Q_{\text{rad,net}}}{A} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (2.14)$$

นอกจากรูปแบบสมการ (2.14) แล้วรูปแบบสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณการแผ่รังสีเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{rad,net}} = h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (5.15)$$

โดยที่ h_r คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีหน่วยเป็น ($\text{W/m}^2 \text{K}$) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s - T_{\text{sur}})(T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \quad (5.16)$$

2.7.4 การถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนรวมกัน (Combined Convection and Radiation)

เมื่อการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการพาและการแผ่รังสีความร้อนพร้อมกัน และอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาและการแผ่รังสีความร้อนไม่ต่างกันมาก การวิเคราะห์หาค่าของการถ่ายเทความร้อนยุ่งยากมาก แต่ในบางกรณี เราอาจประมาณค่าของการถ่ายเทความร้อน โดยการรวมอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพาและการแผ่รังสีเข้าด้วยกันได้ เช่นการไหลของก๊าซที่ได้จากการสันดาป ซึ่งประกอบด้วย CO_2 , CO และ H_2O ซึ่งมีอุณหภูมิ T_h ในท่อซึ่งมีอุณหภูมิผนัง T_c การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไปสู่ผนังท่อ เกิดขึ้นทั้ง โดยการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน หากอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนมีค่าไม่มากนัก อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมได้โดยประมาณ จากการรวมอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งสองวิธีเข้าด้วยกันดังนี้

$$q = h(T_h - T_c) + h_r(T_h - T_c)$$

$$q = (h + h_r)(T_h - T_c)$$

$$q = h_{cr}(T_h - T_c) \quad (5.17)$$

โดยที่ h_{cr} คือสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนรวมของการพาและการแผ่รังสีความร้อน

2.7.5 การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ (Heat Transfer with Change of Phase)

เมื่อสารเปลี่ยนสถานะ มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นพร้อมกันไปด้วย ยกตัวอย่างเช่นเมื่อไอของสารเคลื่อนที่มาสัมผัสกับวัตถุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ไอควบแน่นกลายเป็นของเหลวในกระบวนการดังกล่าว ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากไอเป็นของเหลวของสาร

ถูกคายออกมา ซึ่งต้องถูกระบายออกไป ในทางตรงกันข้าม หากของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไอ เช่น การเดือดและการระเหย จะต้องการความร้อนซึ่งถูกเก็บไว้ในไอ ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง เป็นของเหลวก็เช่นเดียวกัน ต้องมีการถ่ายเทความร้อนไปให้สาร และความร้อนแฝงจะถูกเก็บไว้ในของเหลว

การถ่ายเทความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะของสารนี้ มีความสำคัญมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ เครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากที่อาศัยหลักการเปลี่ยนสถานะของสารในการระบายความร้อนวิศวกรจึงควรมีความสามารถที่วิเคราะห์และคำนวณหาปริมาณความร้อนในระหว่างการเปลี่ยนสถานะของสารได้ (นักสิทธิ์ ภูวัฒนาศัย, 2526)

2.7.6 การนำความร้อนของทรงกระบอก

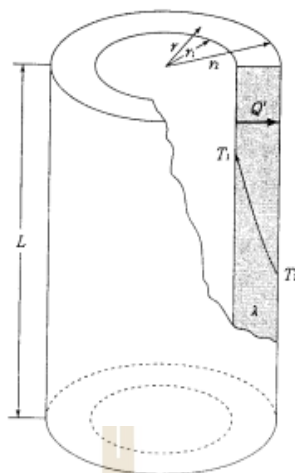
ในทรงกระบอกเช่นรูปที่ 2.9 การกระจายของอุณหภูมิตามแนวแกนกลางสม่ำเสมอ มีแต่การกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีเท่านั้น ในกรณีนี้ความร้อนไหลจากผิวด้านในออกด้านนอก (หรือในทิศทางตรงข้าม) ตามแนวรัศมี ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน λ มีค่าคงที่และภายในทรงกระบอกไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวทรงกระบอกที่มีรัศมี r และมีความยาวหนึ่งหน่วยตลอดทั่วทั้งพื้นผิว Q' [W/m] มีค่าคงที่ตลอด ณ รัศมี r ใดๆ

$$q = \frac{Q'}{2\pi r} \quad (2.18)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปแทนค่าในสมการของ Fourier และอินทิเกรตแล้วได้ว่า

$$q = \frac{Q'}{2\pi r} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (2.19)$$

$$dT = \left(\frac{Q'}{2\pi r} \right) \left(\frac{1}{r} \right) dr, \quad T = \frac{Q'}{2\pi r} \ln r + c$$



รูปที่ 2.9 การนำความร้อนของทรงกระบอก (นักสิทธิ์ กุวัฒนาชัย, 2526)

ในที่นี้เมื่อแทนค่าเงื่อนไขตั้งต้นว่าเมื่อ $r = r_1$ แล้ว $T = T_1$ และเมื่อ $r = r_2$ แล้ว $T = T_2$ ได้ว่า

$$T_1 - T_2 = \frac{Q'}{2\pi r} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q'}{2\pi r} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมด Q (W) ที่ถ่ายเทจากผิวด้านในสู่ผิวด้านนอกเท่ากับ

$$Q = Q' L = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c}, \quad R_c = \frac{1}{2\pi r L} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.20)$$

อุณหภูมิภายในทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.21) ซึ่งมีการกระจายตัวแบบลอการิทึม

$$T(r) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln \left(\frac{r}{r_1} \right), \quad T(r) = T_2 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right)} \ln \left(\frac{r_2}{r} \right) \quad (2.21)$$

จากรายงานของ รตินันท์ เหลือมพล, สิทธิธ สุภาคาร, สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ และ อภิชาติ อัจฉนาเสียว (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมการการอบแห้งภายใต้สภาวะสูญญากาศ โดยใช้สมการดิฟเฟอเรนซ์เชิงเส้น 3 สมการมาอธิบายเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลภายในวัสดุอบแห้ง และใช้ทฤษฎีทางไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์มาแก้สมการ แล้วใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณและทำนายผลสำหรับวัสดุอบแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย แครอทกล้วย และข่า มาทำการอบแห้งภายใต้สภาวะสูญญากาศโดยใช้ความร้อนจากเครื่องสูบลมความร้อน จากนั้นนำเอาผลการทำนายที่ได้จากสมการไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง กำหนดให้วัสดุอบแห้งมีลักษณะเป็นรูปแบบทรงกระบอกสั้นและมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลในรูปแบบ 2 มิติ จากผลการทดลองอบแห้งวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูง ความดันอบแห้งต่ำ มีอัตราการอบแห้งสูง ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย และพบว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณให้ผลการทำนายปริมาณความชื้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองอบแห้งได้เป็นอย่างดี (R-Square > 0.95 และ Stand Error มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) โดยความดันที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าอุณหภูมิอบแห้ง

Wang and Brennan (1995) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและความชื้นในระหว่างการอบแห้งของมันฝรั่ง เนื่องจากเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารพร้อมกัน โดยใช้สมการไม่เชิงเส้นของ Crank and Nicolson (1947) เพื่อแก้ปัญหาสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลสารพร้อม ๆ กัน โดยใช้สมการแบบจำลองดังสมการ

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{M_{i-1;n+1} - 2M_{i;n+1} + M_{i+1;n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{M_{i-1;n} - 2M_{i;n} + M_{i+1;n}}{(\Delta x)^2} \right) \right]$$

พบว่าแบบจำลองสามารถคาดการณ์ปริมาณความชื้นและอุณหภูมิที่ระดับแตกต่างกันของมันฝรั่ง มีความถูกต้องเหมาะสม

2.7.7 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแห้งแบบลูกกลิ้งที่พัฒนา

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะห้องอบแห้งเป็นทรงกระบอก โดยได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรดถึงผิวของทรงกระบอกของห้องอบแห้ง จากนั้นผิวด้านในของทรงกระบอกสแตนเลสนำความร้อนไปยังผิวด้านนอก และถ่ายเทความร้อนจากผิวของสแตนเลสไปยังกากมันสำปะหลัง โดยนำความร้อนไปยังอนุภาคที่เกาะบนผิวจากนั้นน้ำที่อยู่ในกากมันสำปะหลังได้รับความร้อนทำให้น้ำระเหยกลายเป็นไอ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึง รายละเอียดของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง หาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีกายภาพและคุณภาพของกากมันสำปะหลัง ทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง แบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง ประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง และศึกษา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ซึ่งมี รายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

3.1 ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง

กากมันสำปะหลังสดได้จากโรงงานแปรงมันสำปะหลัง (บริษัทอุตสาหกรรมแปรง โคราช จำกัด, จังหวัดนครราชสีมา) (รูปที่ 3.1) มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 84.55% (w.b.)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการอบแห้ง

3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) ตู้อบลมร้อน ใช้สำหรับการอบหาความชื้นกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง (รูปที่ 3.2)

2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลพิทัก 3,200 g ความละเอียด 0.01 g ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุอบแห้ง (รูปที่ 3.3)

3) เหล็กทรงกระบอกปริมาตร 386.60 cm³ ใช้สำหรับหาปริมาตรกากมันสำปะหลัง (รูปที่ 3.4)

4) ชุดวัดความหนืด ใช้สำหรับหาความหนืดของกากมันสำปะหลัง (รูปที่ 3.5)



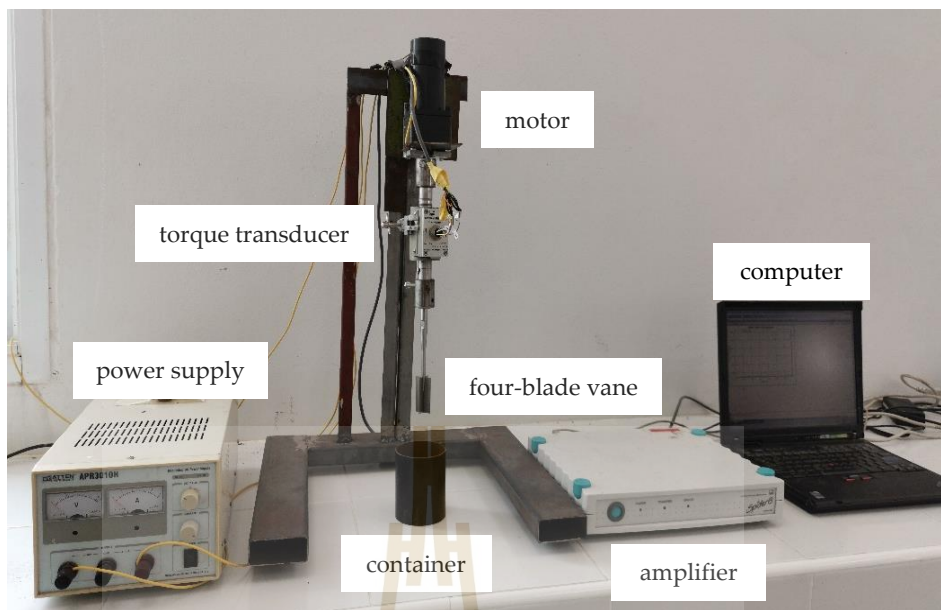
รูปที่ 3.2 ตู้อบลมร้อน



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล



รูปที่ 3.4 เหล็กทรงกระบอก



รูปที่ 3.5 ชุดวัดความหนืด Proposed high-torque vane rheometer scheme for yield stress and viscosity measurement

3.2.2 วิธีการทดสอบหาความหนาแน่น

1) หาความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง โดยนำกระบอกทราบปริมาตรเจาะลงกากมันสำปะหลังที่ระดับความลึก 10 50 และ 100 cm นำทรงกระบอกที่บรรจุกากมันสำปะหลังไปชั่งน้ำหนัก จดบันทึกและหาความหนาแน่นจากสมการที่ (3.1)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่น (kg/m^3)

m คือน้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่บรรจุในทรงกระบอก (kg)

V คือปริมาตรของกากมันสำปะหลัง (m^3)

2) หาความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองได้ถูกนำไปหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน (AOAC, 2000) กล่าวคือก่อนอบแห้งจะชั่งน้ำหนักกากมันสำปะหลังสดประมาณ 10-20 g และนำไปใส่กระป๋องหาความชื้นแล้วนำไปเข้าเครื่องอบแห้งที่

อุณหภูมิ 105 °C อบแห้งเป็นเวลา 24 h ด้วยตู้อบลมร้อน นำกากมันสำปะหลังหลังการอบแห้ง ออกมาชั่งน้ำหนักคำนวณหาความชื้นกากมันสำปะหลังได้จากสมการที่ (3.2)

$$M = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100\% \quad (3.2)$$

โดยที่ M คือความชื้นของกากมันสำปะหลัง (%w.b.)

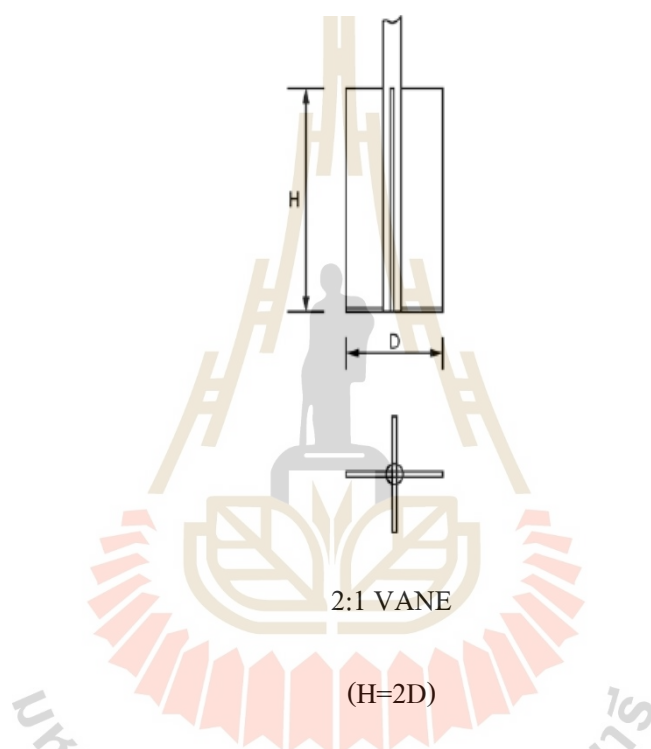
w_i คือน้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนเข้าตู้อบลมร้อน (g)

w_f คือน้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังเข้าตู้อบลมร้อน (g)

3) หาความหนืดของกากมันสำปะหลัง โดยนำตัวอย่างกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 79.49% (w.b.) ปรับความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 12 h ทำให้กากมันสำปะหลังมีความชื้น 66.78% (w.b.) และเวลาอบแห้งที่ 18 h กากมันสำปะหลังมีความชื้น 54.19% (w.b.) จากนั้นจึงนำกากมันสำปะหลังที่ความชื้นต่างๆ ดังกล่าว มาทดสอบว่าความชื้นของกากมันสำปะหลังที่แตกต่างกันจะมีผลต่อความหนืดของกากมันสำปะหลังหรือไม่ ด้วยการ นำกากมันสำปะหลังที่ปรับความชื้น 79.49 66.78 และ 54.19% (w.b.) บรรจุลงภาชนะตามความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังเพื่อทำการทดสอบแรงเฉือน

ขณะที่ Karmakar and Kushwaha (2006) และ Ferraris (1999) กล่าวว่า เครื่อง Brookfield รุ่น DV2TRV ที่ใช้วัดความหนืดกันอยู่ทั่วไปนั้นสามารถวัดค่าความหนืดสูงสุดได้เพียง 0.72 Mili Newton-m เท่านั้น ดังนั้นหากต้องการวัดค่าความหนืดที่สูงกว่านี้จึงต้องมีการนำวิธี Proposed high-torque vane rheometer scheme for yield stress and viscosity measurement ประยุกต์ใช้งาน โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดประกอบไปด้วย Torque Transducer ยี่ห้อ Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) T5/200 Nm ทำหน้าที่วัดแรงบิดที่กระทำต่อเพลลา Vane มีลักษณะสี่ใบเป็นมุมฉาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ความยาวของใบ 50.8 mm ตามมาตรฐานของใบ Vane (ASTM D4648/D4648M – 16, 2018) ทำหน้าที่เป็นพื้นที่สัมผัสของไหลรับแรงที่มากกระทำ ด้วยบรรจุของไหลมีปริมาตร 737 cm³ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ความเร็วรอบ 100 rpm ทำหน้าที่หมุนเพลลาของ Torque Transducer และใบ Vane เพื่อวัดแรง Regulated DC Power Supply ยี่ห้อ Alimentatore Stabilizzato รุ่น APR3010H ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อกำหนดความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบ (79 และ 11 V) เครื่องขยายสัญญาณยี่ห้อ HBM รุ่น Spider 8.0 ทำหน้าที่อ่านสัญญาณจาก Torque Transducer คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่แสดงผลและบันทึกข้อมูล เครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดดังที่กล่าวมานั้นมีขั้นตอนและวิธีการดังอธิบายต่อไปนี้

ในการทดลองหาค่าความหนืดของกากมันสำปะหลังครั้งนี้ใช้หลักการนำใบ Vane เหนือวัสดุที่เป็นของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว (semi-solid) ให้เกิดแรงเฉือนสูงสุด (Rao, 1999) (รูปที่ 3.6) ลักษณะของใบมี 4 ใบ ตั้งฉากและมีขนาดของความสูงเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบมีดตามมาตรฐาน ASTM D4648/D4648M-16 (2018) ความสูงของใบ Vane 50.8 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของใบ 25.4 mm. โดย Qiu and Rao (1988) ได้นำมาประยุกต์ใช้หาความหนืดของซอสแอปเปิ้ลที่มีส่วนผสมของเนื้อแอปเปิ้ลขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 3.6 ลักษณะของใบ Vane มีความสูง (H) เป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) (ASTM D4648/D4648M-16, 2018)

วิธีการทดลอง ทำการเปรียบวัดค่าแรงบิด Torque transducer โดยใช้หลักการให้แรงบิดที่ทราบค่าแน่นอนแก่ชุดวัดแรงบิด (Torque transducer) ซึ่งการทดลองนี้ประกอบด้วยชุดหมุนที่ต่อกับคานยาว 0.5 m โดยมีชุดน้ำหนักถ่วงไว้กับคานเพื่อสร้างค่าแรงบิดที่ทราบค่าแน่นอน เริ่มจาก 0.09 – 1.96 N โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.098 N จากนั้น Torque transducer ส่งสัญญาณไปยังเครื่องขยายสัญญาณ Spider 8.0 ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปแสดงผลบนคอมพิวเตอร์และบันทึกข้อมูลเป็น mV นำค่า mV ที่บันทึกหาความสัมพันธ์กับแรงบิดที่เกิดขึ้นสร้างสมการหาแรงบิด โดยคำนวณหาแรงบิดจากสมการที่ (3.3) (Meriam and Kraige, 2011)

$$T=FL \quad (3.3)$$

โดยที่ T คือแรงบิด (N m)
 F คือแรงที่กระทำบนคาน (N)
 L คือระยะตั้งฉากของแรงกระทำ (m)

วัดความเค้นเฉือนสูงสุด เตรียมกากมันสำปะหลังที่ทำการปรับความชื้น 79.49 66.78 และ 54.19% (w.b.) บรรจุลงภาชนะขนาด 737 cm³ ตามความหนาแน่นของ กากมันสำปะหลัง 1050 kg/m³ ตั้งค่าอัตราเฉือนด้วย Regulated DC Power Supply รุ่น APR3010H ที่ 7.9 และ 11 V ทำให้มอเตอร์ DC หมุนแปรผันตาม V ของมอเตอร์ให้ความเร็วรอบที่ 64 76 และ 97 rpm วัดแรงบิดสูงสุดของแต่ละสภาวะ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด สูงสุดกับความเค้นเฉือนสูงสุดได้จากสมการที่ (3.4) (Dzuy and Boger, 1983)

$$\tau_m = \frac{T_m}{K} \quad (3.4)$$

โดยที่ τ_m คือความเค้นเฉือนสูงสุด (N/m²)
 T_m คือแรงบิดสูงสุด (N m)
 K คือค่าคงที่ใบ Vane (m³)

สมมติว่าการกระจายแรงเฉือนมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งใบ Vane ดังนั้นคำนวณหา ค่า K ของใบ Vane ได้จากสมการที่ (3.5)

$$K = \frac{\pi D^2 H}{2 \times 10^9} \left[1 + \frac{D}{3H} \right] \quad (3.5)$$

การหาค่าความหนืด Brummer (2006) ได้รายงานว่าการหาค่าความหนืดของวัสดุ เกษตรและอาหารที่มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งและสารแขวนลอยสามารถหาได้โดยใช้หลักการของ Vane rheometric ดังนั้นสามารถใช้เทคนิค Vane rheometric ในการหาค่าความหนืดของ กากมันสำปะหลังที่ความชื้น 79.49 66.78 และ 54.19% (w.b.) นั้นได้จากความสัมพันธ์ของ

ความเค้นเฉือนสูงสุดและอัตราเฉือน (Genovese and Rao, 2003) โดยสามารถคำนวณค่าความหนืดของกากมันสำปะหลังได้จากสมการที่ (3.6)

$$\eta = \frac{\tau_m}{\dot{\gamma}} \quad (3.6)$$

โดยที่ η คือค่าความหนืด (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ คือค่าอัตราเฉือน (1/s) ซึ่งอัตราเฉือนมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.7) (Genovese and Rao, 2005)

$$\dot{\gamma} = k_s \frac{N}{60} \quad (3.7)$$

โดยที่ N คือความเร็วรอบการหมุน (rpm)

k_s คือค่าคงที่ของใบ Vane ที่มีอัตราส่วน 2 : 1 มีค่าเท่ากับ (11.6/rev)

3.3 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ต้นแบบ

วิธีการดำเนินการวิจัยสร้างเครื่องต้นแบบประกอบด้วย วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบและเกณฑ์การออกแบบ ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

3.3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ

- 1) ท่อสแตนเลส ใช้สำหรับสร้างลูกกลิ้งอบแห้ง
- 2) แผ่นสแตนเลส ใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง
- 3) เหล็กฉาก ใช้สำหรับสร้างโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง
- 4) ลูกปืน แบริ่ง
- 5) Nut, Bolt, อุปกรณ์จับยึด
- 6) มอเตอร์ไฟฟ้า ใช้เป็นต้นกำลังเครื่องอบแห้ง
- 7) มอเตอร์เกียร์ทด (60 : 1)
- 8) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ใช้เป็นแหล่งความร้อนของเครื่องอบแห้ง
- 9) สายไฟ
- 10) อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เบรกเกอร์ รีเลย์ แมกเนติก และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ

- 1) เครื่องตัดเหล็ก
- 2) เครื่องเชื่อมชิ้นงาน
- 3) สว่านไฟฟ้า
- 4) เครื่องเจาะชิ้นงาน
- 5) เครื่องเจียรระโนชิ้นงาน
- 6) เครื่องกลึงชิ้นงาน
- 7) ชุดประแจ
- 8) ชุดเครื่องมือวัด
- 9) เครื่องมือช่างอื่นๆ

3.3.3 หลักเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบ

- 1) เครื่องอบแห้งสามารถทำงานต่อเนื่องได้
- 2) เครื่องอบแห้งสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะชิ้นหนืดได้
- 3) เครื่องอบแห้งถูกสุขลักษณะของการผลิตอาหาร
- 4) ระบบให้ความร้อนแก่ลูกกลิ้งอบแห้งใช้ทำความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า

3.3.4 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งมีส่วนประกอบหลักอยู่สามส่วนคือ ลูกกลิ้งอบแห้ง ระบบให้ความร้อนแก่ลูกกลิ้ง และระบบหมุนลูกกลิ้งอบแห้ง การออกแบบดำเนินการดังนี้

- 1) พื้นที่ของลูกกลิ้งอบแห้งสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์ ขนาดของลูกกลิ้งกำหนดตามขนาดท่อสแตนเลสที่มีขายตามท้องตลาด มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 26.5 cm ความยาวของท่อเลือกตามขนาดของฮีตเตอร์ไฟฟ้า ยาว 60 cm พื้นที่ของลูกกลิ้งอบแห้งเป็นทรงกระบอก

$$2\pi rh = 2 \times 3.14 \times 13.25 \times 60$$

$$4,992.6 \text{ cm}^2 = 0.499 \text{ m}^2$$

ลูกกลิ้งอบแห้งเป็นลูกกลิ้งคู่ $0.499 \times 2 \text{ m}^2 = 0.998 \text{ m}^2$

ออกแบบให้ความหนาของแผ่นฟิล์มกากมันสำปะหลัง สามารถปรับได้ โดยการทดลองการป้อนกากมันสำปะหลังเบื้องต้นพบว่าที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่กากมันสำปะหลังสามารถเกาะเป็นฟิล์มผ่านได้มีระยะห่างอยู่ที่ 0.15 mm จึงให้คำนวณพื้นที่ของแผ่นฟิล์ม

$$0.998 \text{ m}^2 \times 0.00015 \text{ m} = 0.000148 \text{ m}^3$$

พื้นที่ทำการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ระยะห่างลูกกลิ้ง 0.15 mm มีค่าเท่ากับ 0.000148 m^3 ทดลองหาค่า Bulk density ของกากมันสำปะหลังพบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 84.55% (w.b.) มีค่า Bulk density 1050 kg/m^3 หาจำนวนรอบของลูกกลิ้งที่พาทากมันสำปะหลัง 1 kg

$$\frac{1}{1050} = 0.00095 \text{ m}^3$$

$$\frac{0.00095 \text{ m}^3}{0.000148 \text{ m}^3} = 6.43$$

ดังนั้นอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ 1 kg ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง 26.5 cm ยาว 60 cm ระยะห่างของลูกกลิ้ง 0.015 cm ลูกกลิ้งต้องหมุน 6.43 รอบ

2) การออกแบบชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Infrared Heater) การออกแบบเลือกใช้กากมันสำปะหลังในการออกแบบชุดทำความร้อน โดยพิจารณาจากค่าความร้อนจำเพาะของกากมันสำปะหลัง หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับองค์ประกอบในกากมันสำปะหลัง โดยสามารถทำนายค่าได้จากสมการ (3.8) (อัมพวัน ตันสกุล, 2551)

$$C_p = m_w C_w + m_c C_c + m_p C_p + m_f C_f + m_a C_a \quad (3.8)$$

โดยที่ C_p คือค่าความจุความร้อนของกากมันสำปะหลัง ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)

m คือน้ำหนักขององค์ประกอบ

C_w คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)

C_c คือค่าความร้อนจำเพาะของคาร์โบไฮเดรต ($1.40 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)

C_p คือค่าความร้อนจำเพาะของโปรตีน ($1.60 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)

C_f คือค่าความร้อนจำเพาะของไขมัน (1.70 kJ/kg °C)

C_a คือค่าความร้อนจำเพาะของถั่ว (0.80 kJ/kg °C)

จากการศึกษาองค์ประกอบของกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบเฉลี่ย ดังนี้ ความชื้น 84.77% คาร์โบไฮเดรต 7.59% โปรตีน 0.31% ไขมัน 0.04 ถั่ว 0.34% กากมันสำปะหลัง 1 kg มีองค์ประกอบ

มวลของน้ำ

$$1 \times \frac{84.77}{100} = 0.8477$$

มวลของคาร์โบไฮเดรต

$$1 \times \frac{7.59}{100} = 0.0759$$

มวลของโปรตีน

$$1 \times \frac{0.31}{100} = 0.0031$$

มวลของไขมัน

$$1 \times \frac{0.04}{100} = 0.0004$$

มวลของถั่ว

$$1 \times \frac{0.34}{100} = 0.0034$$

แทนค่าในสมการ 3.8

$$C_p = (4.18 \times 0.8477) + (1.40 \times 0.0759) + (1.60 \times 0.0031) + (1.70 \times 0.0004)$$

$$+ (0.80 \times 0.0034)$$

$$C_p = 3.66 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จากสมการ (3.9)

$$\frac{Q}{t} = \dot{m} C_p T \quad (3.9)$$

อุณหภูมิอบแห้ง 150°C (Jaito, et al., 2017) เป็นข้อมูลในการออกแบบ

$$\frac{Q}{t} = \dot{m} C_p T$$

$$\frac{Q}{t} = 0.0028 \times 3.66 \times 150$$

$$\frac{Q}{t} = 1.54$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของกากมันสำปะหลัง 1.54 kJ/s

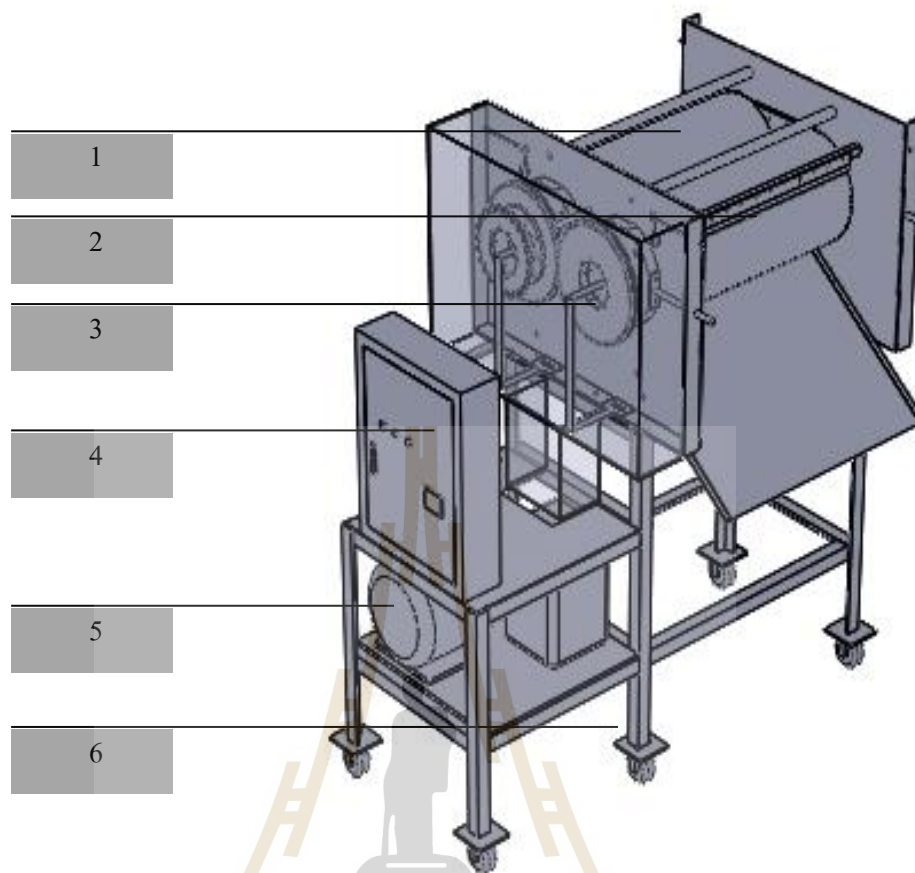
ดังนั้นห้องอบแห้งแบบลูกกลิ้งต้องการพลังงานความร้อนที่ 1.54 kW ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่มีขายตามท้องตลาดมีขนาด 1.3 kW เลือกใช้ 2 แท่งต่อลูกกลิ้ง

3.4 การทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์

1) กากมันสำปะหลังสดได้จากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลัง (บริษัท อุตสาหกรรม แป้งโคราช จำกัด, จังหวัดนครราชสีมา) มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 84.55% (w.b.)

2) เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลัง เป็นเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น โดยใช้ความร้อนจากอินฟราเรด (รูปที่ 3.7 และรูป 3.8) ประกอบไปด้วย (1) ลูกกลิ้ง 1 คู่ทำจากสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 26.5 cm และยาว 60 cm ทำหน้าที่อบแห้งผลิตภัณฑ์ (2) ใบมีดทำจากสแตนเลส ทำหน้าที่ขูดผลิตภัณฑ์แห้งออกจากลูกกลิ้ง (3) ฮีตเตอร์อินฟราเรด ติดตั้งอยู่ภายในลูกกลิ้ง ทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนให้แก่ลูกกลิ้ง (4) ตู้ควบคุมมีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบของลูกกลิ้ง (5) มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้นกำลังในการหมุนลูกกลิ้ง (6) โครงสร้างเครื่องอบแห้งทำหน้าที่รับน้ำหนักของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง

3.4.2 วิธีการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและความเร็วรอบของลูกกลิ้งต่อสมรรถนะการอบแห้ง โดยออกแบบการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟคทอเรียลใน CRD โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ (130 140 และ 150°C) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (0.15 0.30 และ 0.50 mm) ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง (0.19 0.34 และ 0.51 rpm) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยการทดสอบเริ่มจากนำกากมันสำปะหลังไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ตามสมการที่ (3.2) ทำการตั้งค่าอุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและความเร็วรอบของลูกกลิ้ง ตามสภาวะการอบแห้งที่กำหนด จากนั้นป้อนกากมันสำปะหลังจำนวน 1 kg (รูปที่ 3.8) เข้าสู่เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ระหว่างการทดสอบทำการบันทึกเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง น้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่ออกจากเครื่องอบแห้งและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง



รูปที่ 3.8 ป้อนกากมันสำปะหลังเข้าเครื่องอบแห้ง

3.4.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

ทำการประเมินสมรรถนะในการอบแห้ง ด้วยการพิจารณาค่าต่าง ๆ ประกอบด้วย ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อัตราการอบแห้ง และความสามารถในการอบแห้ง ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ฮีตเตอร์อินฟราเรดและระบบควบคุม สามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) ต่อปริมาณน้ำ 1 kg ที่ระเหยออกจากกากมันสำปะหลัง (Sharma and Prasad, 2006, เกียรติศักดิ์ ใจโต และคณะ, 2016) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.10

$$SEC = \frac{3.6 \times E}{m_{\text{water}}} \quad (3.10)$$

โดยที่ SEC คือค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
 E คือพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kW-h)
 m_{water} คือมวลของน้ำที่ระเหยออกจากกากมันสำปะหลัง (kg)

2) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เป็นความสามารถในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ โดยดูจากอัตราการระเหยน้ำออกจากกากมันสำปะหลังต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (วิเชียร ดวงสีเสน, 2556) สามารถหาได้จากสมการ (3.11)

$$DR = \frac{m_{\text{water}}}{t} \quad (3.11)$$

โดยที่ DR คืออัตราการอบแห้ง (kg/h)
 t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

3) ความสามารถในการอบแห้ง (Drying capacity, DC) บ่งบอกถึงความสามารถในผลิตกากมันสำปะหลังต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Ademiluyi et al., 2010) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.12)

$$DC = \frac{W_p}{t} \quad (3.12)$$

โดยที่ DC คือความสามารถในการทำแห้ง (g/min)
 W_p คือน้ำหนักกากมันสำปะหลังสด (g)
 t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง (min)

3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

3.5.1 การอบแห้งเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ทำการอบแห้งกากมันสำปะหลัง โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ (130 140 และ 150°C) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (0.15 0.30 และ 0.50 mm) โดยจะใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมดเท่ากับ 311 s และทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ซึ่งขั้นตอนของการอบแห้งเพื่อศึกษาแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์นั้นจะเริ่มจากนำกากมันสำปะหลังไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อนตามสมการ (3.2) จากนั้นทำการตั้งค่าอุณหภูมิ และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ตามสภาวะการอบแห้งที่กำหนด แล้วจึงทำการป้อนกากมันสำปะหลังจำนวน 1 kg (รูปที่ 3.8) ลงไปในเครื่อง พร้อมทั้งทำการจดบันทึกค่าความชื้นของกากมันสำปะหลังที่เวลา 0 44 59 88 118 177 และ 311 s ตามลำดับ

3.5.2 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นำค่าความชื้นที่ได้จากการหั่วข้อที่ 3.4.1 มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.13) (Xanthopoulos, Yanniotis and Lambrinos, 2010)

$$MR_t = \frac{w_t - w_c}{w_o - w_c} \quad (3.13)$$

โดยที่ MR_t คืออัตราส่วนความชื้น
 w_t คือความชื้นที่เวลาใด ๆ (%db)
 w_c คือความชื้นสมดุลของกากมันสำปะหลัง (%db)
 w_o คือความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง (%db)

จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งไปวิเคราะห์การถดถอยตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งสำหรับวัสดุทางการเกษตรและอาหาร (Hii, Law and Cloke, 2009) นั้นส่วนใหญ่มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล เช่นแบบจำลองของ Newton และ Page ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (3.14) และ (3.15)

$$MR = \exp^{(-kt)} \quad (3.14)$$

$$MR = \exp^{(-kt^n)} \quad (3.15)$$

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 นี้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ต่อไป ซึ่งจะทำการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาค่าตัวแปรของแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Root Mean Squared Error, RMSE) ดังสมการ (3.16) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) ดังสมการ (3.17) ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะเป็นดัชนีชี้วัดเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม โดยค่า R^2 เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งยังมีค่าสูงยิ่งดี ขณะที่ค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งยังมีค่าต่ำยิ่งดี ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งที่เหมาะสมจึงควรมีค่า R^2 สูง และค่า RMSE ต่ำ ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งรูปแบบนั้น มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดต่ำ (Yousefi et al., 2012)

$$R^2 = 1 - \frac{(\text{Residual SS})}{(\text{Corrected total SS})} \quad (3.16)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pred},i})^2} \quad (3.17)$$

โดยที่ $\text{MR}_{\text{exp},i}$ คืออัตราส่วนความชื้นของการทดลอง
 $\text{MR}_{\text{pred},i}$ คือค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
 N คือจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.5.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและค่าพลังงานกระตุ้น

วิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้นแบบจำลองการอบแห้งเป็นแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้งแบบจำลองที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักผลไม้ ได้แก่สมการเอมพิริคัล ซึ่งจะมีรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ซึ่ง

สันนิษฐานว่าการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นในมิติเดียวเท่านั้น (กรณีวัสดุที่รูปทรงเป็นแผ่นระนาบยาวมาก infinite slab) สามารถหาได้จากสมการ (3.18) (Crank, 1975)

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} e^{\left(\frac{-(2i-1)^2 \times \pi^2 \times D_{\text{eff}} \times t}{4L^2} \right)} \quad (3.18)$$

สำหรับการอบแห้งที่ใช้เวลานาน จะมีเพียงเทอมแรกของสมการ (3.18) ที่มีความสัมพันธ์ในการประเมินค่า MR_t ดังนั้นจึงคำนวณได้ง่ายขึ้น โดยหาจากสมการ (3.19)

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-D_{\text{eff}} \times \pi^2 \times t}{4L^2} \right)} \quad (3.19)$$

- โดยที่ D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m^2/s)
 L คือความหนาของกากมันสำปะหลัง (m)
 t คือเวลาในการอบแห้ง (s)

การคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกากมันสำปะหลัง สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส ดังแสดงในสมการ (3.20) (Afzal and Abe, 1998)

$$D_{\text{eff}} = D_0 \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (3.20)$$

- โดยที่ E_a คือค่าพลังงานกระตุ้น (J/mol)
 T คืออุณหภูมิของอากาศร้อน (K)
 R คือค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/mol K)
 D_0 คือค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส (m^2/s)

3.6 การวิเคราะห์ค่าคุณภาพของกากมันสำปะหลัง

3.6.1 วิเคราะห์ความชื้น (Moisture)

การวิเคราะห์ค่าความชื้นที่มีอยู่ในกากมันสำปะหลังมีความสำคัญเพราะตัวอย่างที่มีความชื้นสูง ก็จะมีโอกาสเสียได้ง่าย นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อการผสมกากมันสำปะหลังกับวัตถุดิบอื่น โดยวิธีวิเคราะห์หาความชื้นจะทำตามมาตรฐาน (AOAC, 2000) ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2

3.6.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (Ash)

เถ้าเป็นส่วนของสารอนินทรีย์ โดยค่าของเถ้ามีค่าสูงมากกว่าปกติอาจมีการปลอมปนของทรายโดยมีวิธีการหาเถ้าคือ 1) นำด้วยเปล่าอบที่อุณหภูมิ 100°C เอาออกใส่โถดูดความชื้นปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก 2) ชั่งน้ำหนักกากมันสำปะหลังประมาณ 2 g นำไปเผาด้วยเตาเผาไฟฟ้า (รูปที่ 3.9) ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 24 h นำตัวอย่างออกมาวางในโถดูดความชื้นจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณเถ้าได้จากสมการ (3.21) (Sluiter et al., 2008)

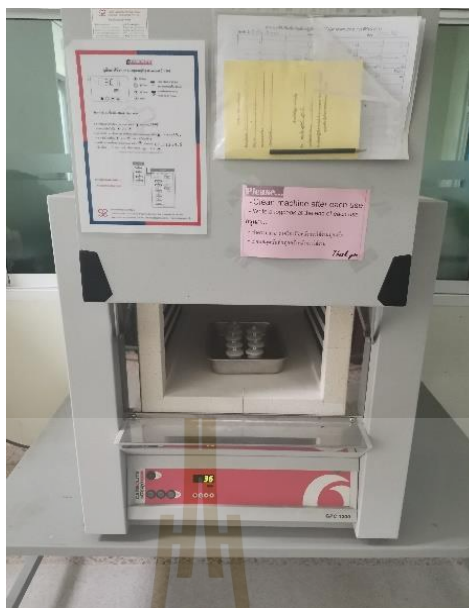
$$\% \text{ Ash} = \frac{w_2 - w_1}{w} \times 100 \quad (3.21)$$

โดยที่ w คือน้ำหนักตัวอย่าง (g)

w_1 คือน้ำหนักถ้วย (g)

w_2 คือน้ำหนักถ้วยบวกกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (g)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.9 เตาเผาหาปริมาณไขมันของกากมันสำปะหลัง

3.6.3 การวิเคราะห์หาไขมันหยาบ (crude fat)

การวิเคราะห์หาปริมาณไขมันสกัดด้วยสารอินทรีย์ ตัวทำละลายที่นิยมกันคือ petroleum ether โดยมีวิธีการคือ 1) ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดจำนวน 2 g ห่อด้วยกระดาษกรองใส่ลงใน cellulose thimble นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 h แล้วนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก 2) เปิดเครื่องสกัดตั้งค่าอุณหภูมิ 80°C นำตัวอย่างเข้าเครื่องสกัด (รูปที่ 3.10) เติม petroleum ether ลงในถ้วยสกัด 50 ml ตั้งค่าการทำงานของเครื่องเวลาสกัด 3 h จากนั้นนำถ้วยออกจากเครื่องสกัดนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำถ้วยบรรจุไขมันไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณไขมันได้จากสมการที่ 3.22 (AOAC, 2000)

$$\% \text{ crudefat} = \frac{(w_3 - w_2)}{w_1} \times 100 \quad (3.22)$$

โดยที่ w_1 คือน้ำหนักตัวอย่าง (g)

w_2 คือน้ำหนักถ้วย (g)

w_3 คือน้ำหนักถ้วยบวกกับน้ำหนักไขมัน (g)



รูปที่ 3.10 เครื่องสกัดไขมัน

3.6.4 การวิเคราะห์หาโปรตีน (crude protein)

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนได้วิเคราะห์ในรูปแบบของปริมาณไนโตรเจนโดยวิธี Kjeldahl (1883) แล้วคำนวณกลับไปปริมาณโปรตีน ตัวอย่างของไขมันสำปะหลังถูกย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4 conc.) ในสภาพที่มีความร้อน และตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) จนสารละลายอินทรีย์วัตถุจะสลายไป สารประกอบไนโตรเจนทั้งที่เป็นโปรตีนแท้และไม่ใช่โปรตีน ยกเว้นที่อยู่ในรูปไนเตรต (NO_3) ไนไตรต์ (NO_2) จะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 40% (w/v) ในไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซแอมโมเนียที่กลั่นด้วยกรดบอริกที่มีความเข้มข้น 4% (w/v) เป็นตัวดักจับนำไปไตเตรทหากรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.1 (w/v) เพื่อกำหนดปริมาณของกรดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่สามารถคำนวณหาไนโตรเจนได้ดังนั้นจึงคำนวณโปรตีนดิบจากสมการ (3.23)

$$\% \text{ Crude protein} = \%N \times 6.26 \quad (3.23)$$

โดยที่ N คือปริมาณไนโตรเจน

6.25 คือค่าคงที่ โดยทั่วไปโปรตีนมีปริมาณไนโตรเจน 16% ($100/16 = 6.25$)

3.6.5 การวิเคราะห์หาเยื่อใยหยาบ (crude fiber)

การวิเคราะห์เส้นใยนำตัวอย่างกากมันสำปะหลังที่ได้รับการวิเคราะห์ความชื้นและไขมัน มาย่อยสลายด้วยกรดซัลฟิวริก โพรติน แป้ง และน้ำตาลจะถูกย่อยสลาย และนำไปย่อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แป้งที่เหลืออยู่จะถูกย่อยสลายส่วนที่เหลือคือ เยื่อใย (Van et al., 1991)

3.6.6 การหาคาร์โบไฮเดรต

การหาคาร์โบไฮเดรตอย่างง่ายสามารถหาได้จากสมการ (3.24)

$$\%NFE = 100 - (MC + Ash + CP + EE + CF) \quad (3.24)$$

โดยที่ MC คือเปอร์เซ็นต์ความชื้นของกากมันสำปะหลัง (%wb)
 Ash คือเปอร์เซ็นต์เถ้า
 CP คือเปอร์เซ็นต์โปรตีน
 EE คือเปอร์เซ็นต์ไขมัน
 CF คือเปอร์เซ็นต์ไฟเบอร์

3.7 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยการวิเคราะห์ต้นทุน จุดคุ้มทุน และระยะเวลาในการคืนทุน เป็นการคาดคะเนว่าระยะเวลาจากการเริ่มต้นลงทุนถึงเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิ ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่มีค่าเท่ากับการลงทุนและทำการคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุนต่อปี ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของผลการศึกษาประกอบด้วย ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีกายภาพ และคุณภาพของกากมันสำปะหลัง ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง และผลศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

4.1.1 ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง

จากการทดสอบความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังที่ระดับความลึก 10 50 และ 100 cm ของกองกากมันสำปะหลังพบว่าที่ความลึกต่าง ๆ ให้ค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่ 1050 kg/m^3 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นที่ระดับความลึกกากมันสำปะหลังที่ 10 50 และ 50 cm

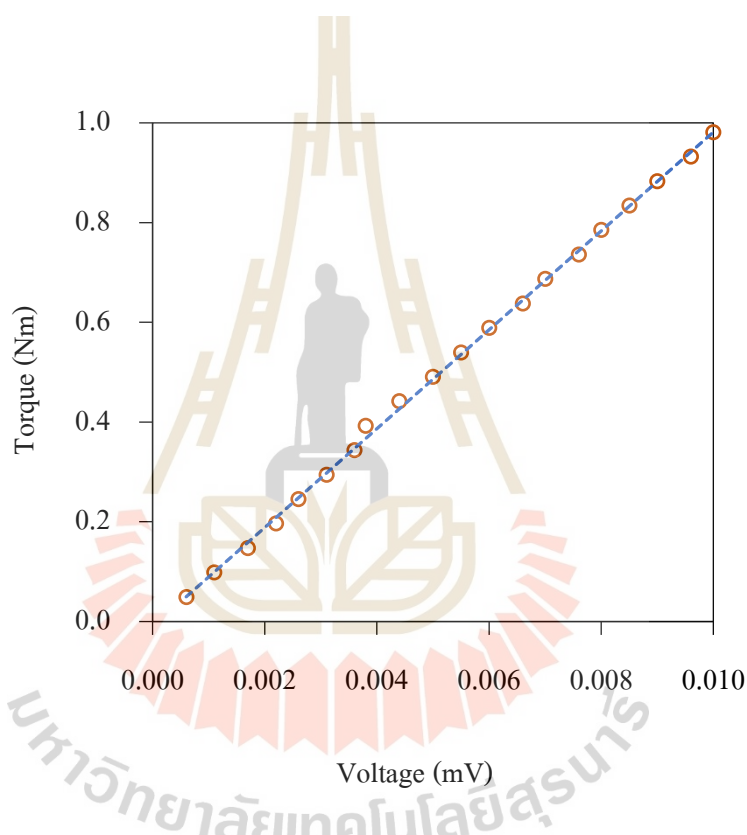
Depth cm	Density kg/m^3
10	1050.43 ± 0.996^a
50	1049.61 ± 1.460^a
100	1050.51 ± 2.006^a

a ตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันบ่งบอกถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.1.2 ความหนืดของกากมันสำปะหลัง

จากการศึกษาหาค่าความหนืดของกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องมือวัดความหนืดแบบใบพัดหมุน (Rotational viscometer) จำเป็นต้องศึกษาและสอบเทียบเครื่องมือวัดความหนืด โดยใช้หลักการวัดแรงบิดของกากมันสำปะหลัง หาค่าแรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลัง เพื่อหาความสัมพันธ์กับความหนืดของกากมันสำปะหลัง

1) หาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงดันไฟฟ้าและแรงบิดของทรานสดิวเซอร์ แสดงดังรูปที่ 4.1 ผล (Torque transducer) โดยให้แรง 0.09 - 1.9 N และความยาวเพลลา 0.5 m แสดงในสมการ (4.1)



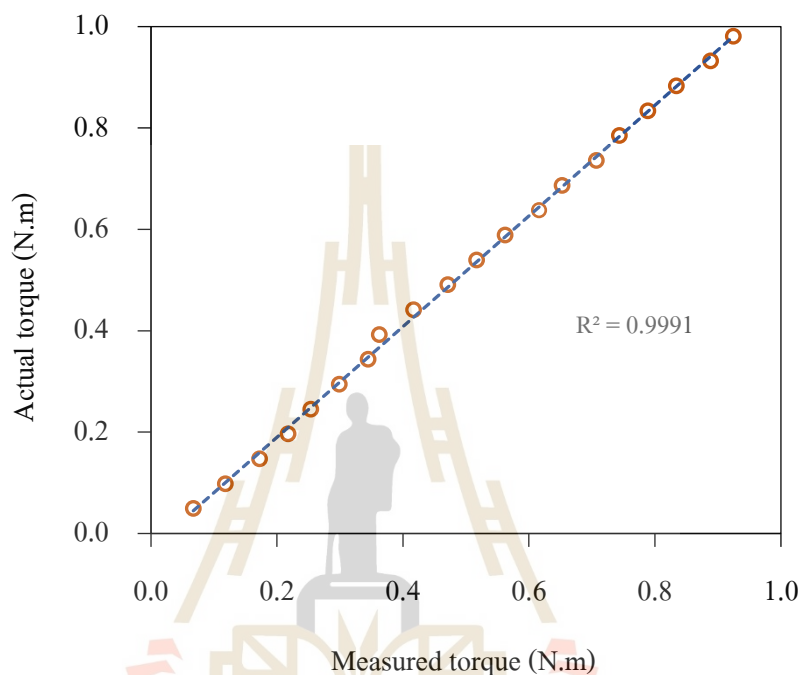
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและแรงบิดของทรานสดิวเซอร์

$$T = 99.129V - 0.0099 \quad (4.1)$$

โดย T คือทอร์ก (Nm)

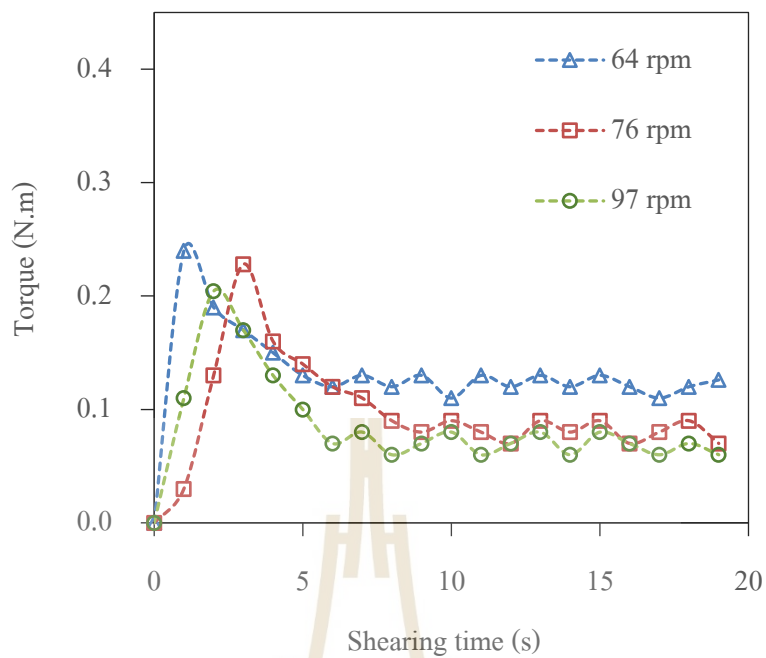
V คือแรงดันของตัวแปลงสัญญาณแรงบิด (mV)

2) ผลการสอบเทียบค่าแรงบิด (Torque) ของทรานสดิวเซอร์กับค่าแรงบิดทางทฤษฎี ค่าแรงบิดที่อ่านได้จากทรานสดิวเซอร์ โดยโปรแกรม Catman DAQ อ่านค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นแรงบิดตามสมการที่ 4.1 ได้ค่าแรงบิดนำมาเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดตามทฤษฎี พบว่ามีค่า $R^2 = 0.991$ แสดงถึงความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือวัดแสดงดังรูปที่ 4.2

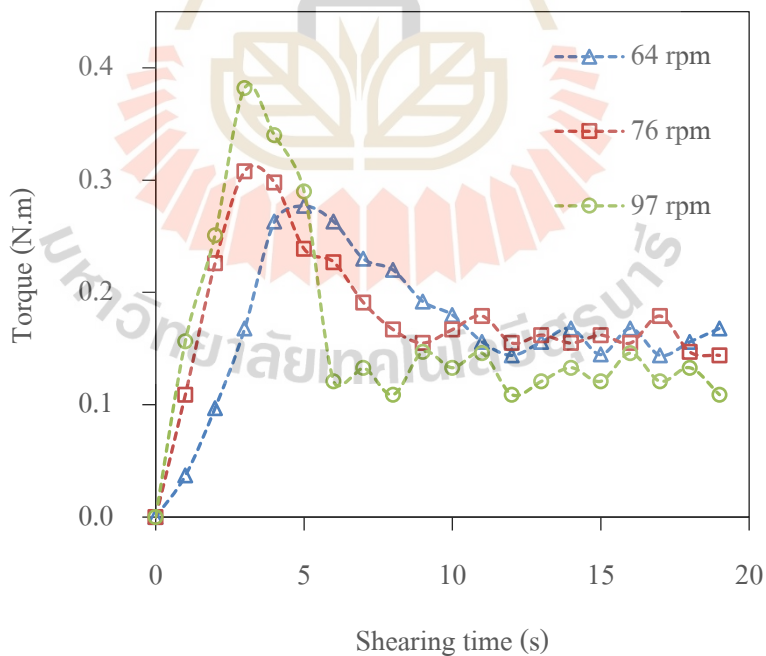


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากทรานสดิวเซอร์กับแรงบิดทางทฤษฎี

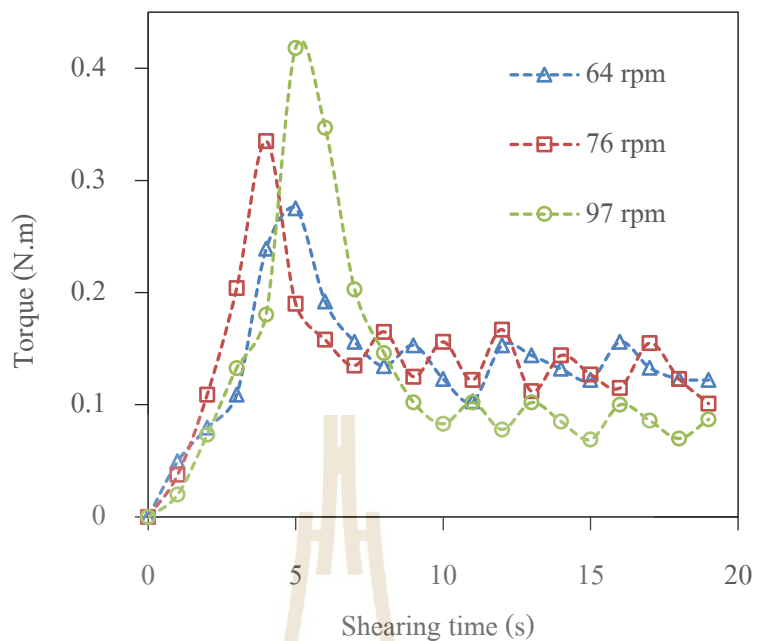
3) ผลการศึกษาแรงบิดสูงสุดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นต่าง ๆ ค่าแรงบิดของกากมันสำปะหลังที่ระดับความชื้น 79.49 66.78 และ 54.19% (w.b.) ที่ความหนาแน่นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลัง 1050 kg/m^3 ปรับความเร็วการหมุนของมอเตอร์ในการวัดค่าแรงบิดที่ 64, 76 และ 97 rpm จากรูปที่ 4.3 พบว่าแรงบิดของกากมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นถึงค่าแรงบิดสูงสุดของกากมันสำปะหลังจากนั้นแรงบิดจะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าแรงบิดค่อนข้างคงที่ซึ่งบ่งบอกถึงเมื่อกากมันสำปะหลังได้รับแรงจนถึงค่าสูงสุดแล้วโครงสร้างการยึดเกาะของกากมันสำปะหลังโดนทำลายทำให้กากมันสำปะหลังเกิดการไหลได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงาน Kim and De Kee (2008) และ Sun and Gunasekaran (2009) เมื่อโครงสร้างของวัสดุโดนทำลายทำให้วัสดุไหลได้ง่ายขึ้น โดยการทดลองนี้พบว่าค่าแรงบิดสูงสุดของกากมันสำปะหลังแสดงดังตารางที่ 4.2



(ก) ที่ความชื้นกากมันสำปะหลัง 79.49% (w.b.)



(ข) ที่ความชื้นกากมันสำปะหลัง 66.78 % (w.b.)



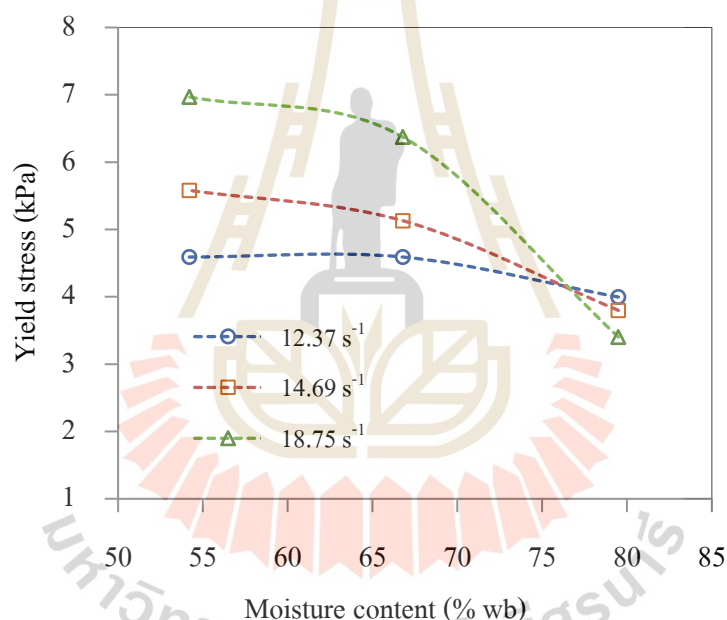
(ค) ที่ความชื้นกากมันสำปะหลัง 54.19% (w.b.)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและอัตราเฉือนที่ความชื้นของกากมันสำปะหลังแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 แรงบิดสูงสุดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นและความเร็วในการหมุนที่แตกต่างกัน โดยใช้ Rotational viscometer

Rotational speed rpm	Moisture content (wet basis)		
	79.49%	66.78%	54.19%
	Torque (N.m)		
64	0.239	0.275	0.275
76	0.228	0.307	0.335
97	0.204	0.382	0.418

4) ผลกระทบของความชื้นที่ส่งผลต่อแรงเฉือนสูงสุด (Yield stress) ของกากมันสำปะหลัง จากรูปที่ 4.4 แสดงแรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังที่อัตราเฉือนแตกต่างกัน อัตราเฉือนของความเร็วการหมุนมอเตอร์ที่ 64 76 และ 97 rpm มีความสัมพันธ์กับอัตราเฉือนเท่ากับ 12.37 14.69 และ 18.75 1/s ตามลำดับ แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังแปรผกผันกับความชื้นของกากมันสำปะหลัง กล่าวคือแรงเฉือนของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงเมื่อความชื้นของกากมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของกากมันสำปะหลังลดลง เมื่อความชื้นเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคเป็นตัวหล่อลื่นทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไต่ได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาผลกระทบของแรงอัด ขนาดอนุภาค และความชื้นที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเม็ดชีวมวลจากหญ้า (Mani, Tabil and Sokhansanj, 2006)

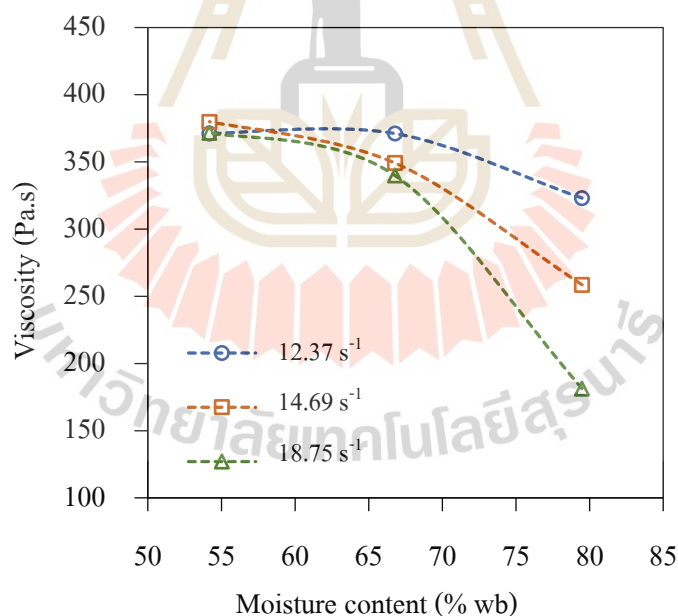


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดกับความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ได้รับอัตราเฉือนแตกต่างกัน

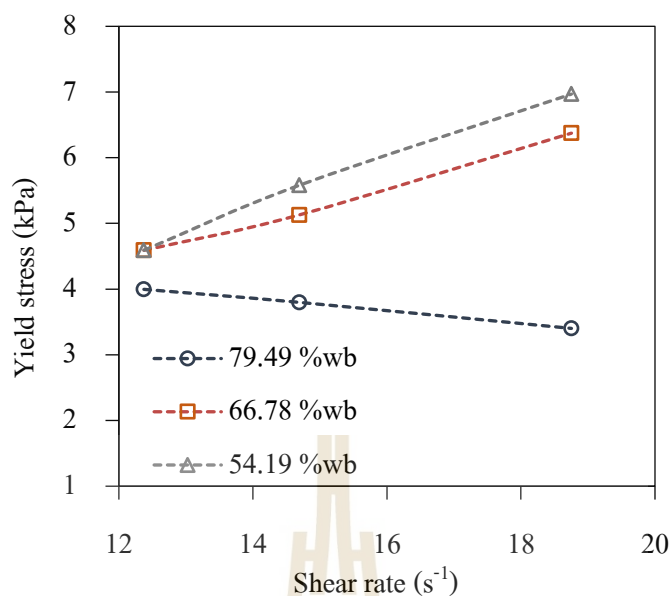
จากรูปที่ 4.4 เมื่อกากมันสำปะหลังมีความชื้น 79.49% การเปลี่ยนแปลงของอัตราเฉือนมีผลเล็กน้อยต่อแรงเฉือนสูงสุด แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังคือ 3.996 3.798 และ 3.401 kPa ที่อัตราเฉือน 12.37 14.69 และ 18.75 1/s แรงเฉือนสูงสุดในกากมันสำปะหลังแตกต่างกันเล็กน้อยเป็นผลมาจากความชื้นสูงทำให้อนุภาคของกากมันสำปะหลังมีน้ำอยู่รอบ ๆ ง่ายต่อการทำลายโครงสร้างการยึดเกาะของกากมันสำปะหลัง ที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง

66.78 และ 54.19% อัตราเฉือนมีผลกระทบต่อแรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลัง เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมันสำปะหลังมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความชื้นของวัสดุลดลงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคสูงขึ้น แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้น 66.78% คือ 4.591 5.130 และ 6.374 kPa และที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 54.19% คือ 4.591 5.581 และ 6.969 kPa ที่อัตราเฉือน 12.37 14.69 และ 18.75 1/s

5) ผลกระทบของความชื้นที่ส่งผลต่อความหนืด (viscosity) ของกากมันสำปะหลัง จากรูปที่ 4.5 แสดงความหนืดของกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นและอัตราการเฉือนต่างกัน ความหนืดมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับปริมาณความชื้น เนื่องจากช่องว่างที่เพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาคของมันสำปะหลังเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของมันสำปะหลังลดลง การยึดเกาะลดลงทำให้ความหนืดของกากมันสำปะหลังลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากการ สร้างแบบจำลองทางกายภาพและตรวจสอบสมการการทำนายของสารละลายน้ำแข็งที่มีการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Mellari, Boumaza and Egolf, 2012)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความชื้นของกากมันสำปะหลังที่ได้รับอัตราเฉือนแตกต่างกัน

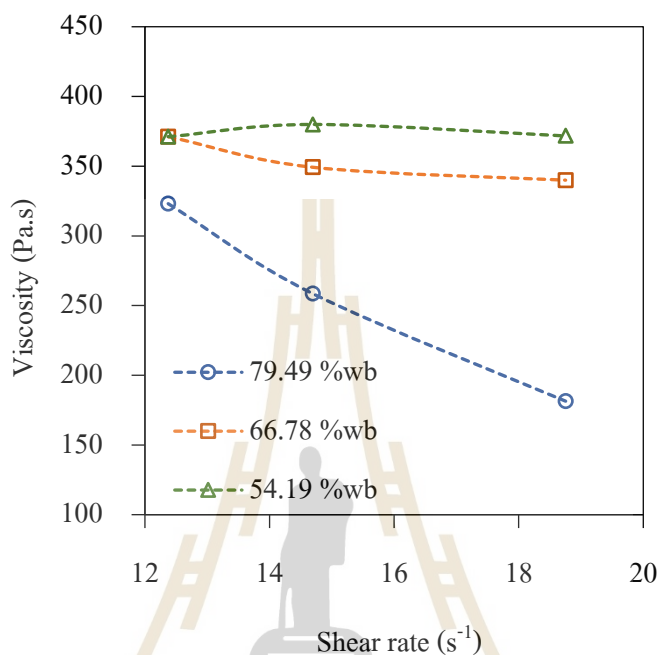


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนสูงสุดกับอัตราเฉือนของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นของกากมันสำปะหลังแตกต่างกัน

6) ผลกระทบของอัตราเฉือนต่อแรงเฉือนสูงสุด (yield stress) ของกากมันสำปะหลัง ในการวิเคราะห์ความเร็วในการหมุนจะถูกแปลงเป็นอัตราเฉือน โดยใช้สมการ (3.7) จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงผลกระทบของอัตราการเฉือนต่อแรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลัง โดยมีความชื้นแตกต่างกันที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 79.49% พบว่าแรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน เป็นผลมาจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของกากมันสำปะหลังส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลดลง ที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 66.78 และ 54.19% แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของมันสำปะหลังมากขึ้นส่งผลให้แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังมีค่าสูงขึ้นซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาการวัดแรงเฉือนสูงสุดของผลผลิตด้วยใบ Vane (Liddel and Boger, 1996)

7) ผลกระทบของอัตราเฉือนต่อความหนืด (viscosity) ของกากมันสำปะหลัง จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นความหนืดของกากมันสำปะหลังมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการไหลของครีมสลัดจากแป้งมันสำปะหลัง (Adebayo, Lateef and Elizabeth 2010) เนื่องจากผลของอัตราเฉือนแปรผันตามความหนืดมากขึ้นเมื่อความชื้นของมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำลายโครงสร้างของของเหลวโดย Hydrodynamic force ที่เกิดในระหว่างการให้

แรงเฉือนหรือเกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบในของเหลวนั้น ส่งผลให้การไหลเกิดได้ง่ายขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งจิรารัตน์ ทัดติยกุล (2554) กล่าวว่าอาหารเหลวส่วนใหญ่เมื่อได้รับอัตราเฉือนเพิ่มขึ้นความหนืดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือนของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นของกากมันสำปะหลังแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 แรงเฉือนสูงสุดและความหนืดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นและอัตราเฉือนแตกต่างกัน

Moisture content (wet basis)						
Shear rate (1/s)	79.49%		66.78%		54.19%	
	Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa.s)	Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa.s)	Yield stress (Pa)	Viscosity (Pa.s)
12.37	3,996.33	323.07	4,590.80	371.12	4,590.80	371.12
14.69	3,798.18	258.16	5,129.78	349.20	5,581.24	379.92
18.75	3,401.87	181.43	6,374.19	339.96	6,968.66	371.66

จากตารางที่ 4.3 แสดงแรงเฉือนสูงสุดและความหนืดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้น 79.49 66.78 และ 54.19% และอัตราเฉือน 12.37 14.69 และ 18.75 1/s โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดแบบใบพัดหมุน (Rotational viscometer) ที่พัฒนาขึ้น โดยที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 54.19% ความหนืดมีค่า 371.12 379.92 และ 371.66 Pa.s ที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 66.78% ความหนืดมีค่า 371.12 349.20 และ 339.96 Pa.s และที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 79.49% ความหนืดมีค่า 596.28 477.23 และ 334.90 Pa.s ที่อัตราเฉือน 12.37 14.69 และ 18.75 1/s ตามลำดับ ดังนั้นการนำค่าแรงเฉือนและความหนืดของกากมันสำปะหลังไปใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบเครื่องจักรสำหรับการแปรรูปมันสำปะหลังจะใช้ค่าสูงสุด โดยค่าแรงเฉือนสูงสุดมีค่า 6,968.66 Pa และค่าความหนืดสูงสุดมีค่า 379.92 Pa.s

4.2 ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

รายละเอียดของการออกแบบ ชิ้นส่วนต่าง ๆ และรูปร่าง ขนาดและรายละเอียดส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ไว้ในภาคผนวก ค

4.2.1 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งต้นแบบ

หลังจากได้ดำเนินการออกแบบและกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งต้นแบบ ดังแสดงรายละเอียดในข้อ 3.3 แล้วจึงได้ดำเนินการสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ ทดสอบเบื้องต้น ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง เครื่องอบแห้งลูกกลิ้งคู่ต้นแบบสำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลังสามารถอบแห้งได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ แสดงดังรูปที่ 4.8

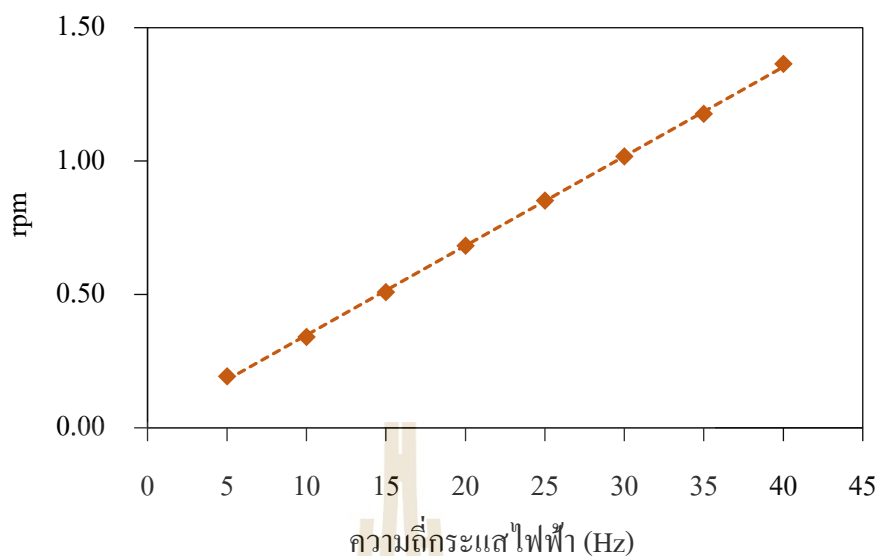
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.8 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่พัฒนาขึ้นสำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง

4.2.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งมีตัวแปรตั้งค่าการทำงาน 3 ปัจจัย ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง สามารถทำงานได้ 0.10 – 6 mm ปรับตั้งค่าโดยใช้ฟิลเลอร์เกจวัดระยะห่าง แล้วขันน็อตทางด้านหน้าเครื่องอบแห้ง ความเร็วรอบของลูกกลิ้งปรับตั้งค่าด้วยอินเวอร์เตอร์ 0 – 50 Hz สร้างความสัมพันธ์กับความเร็วยอบแสดงดังรูปที่ 4.9 และอุณหภูมิการอบแห้งของลูกกลิ้ง 37 – 170°C ตั้งค่าควบคุมโดย Panel Temperature Controller ทำการป้อนกากมันสำปะหลังด้านบนระหว่างลูกกลิ้ง เมื่อลูกกลิ้งหมุนจะพาทากมันสำปะหลังเคลือบลูกกลิ้งเป็นฟิล์มบาง เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวของลูกกลิ้ง ไปยังฟิล์มของกากมันสำปะหลังด้วยการนำความร้อน เมื่อลูกกลิ้งหมุนไปจนถึงใบมีดจะทำการชูดกากมันสำปะหลังออกมาเป็นแผ่นบางหรือผงตกลงภาชนะรองรับด้านล่าง



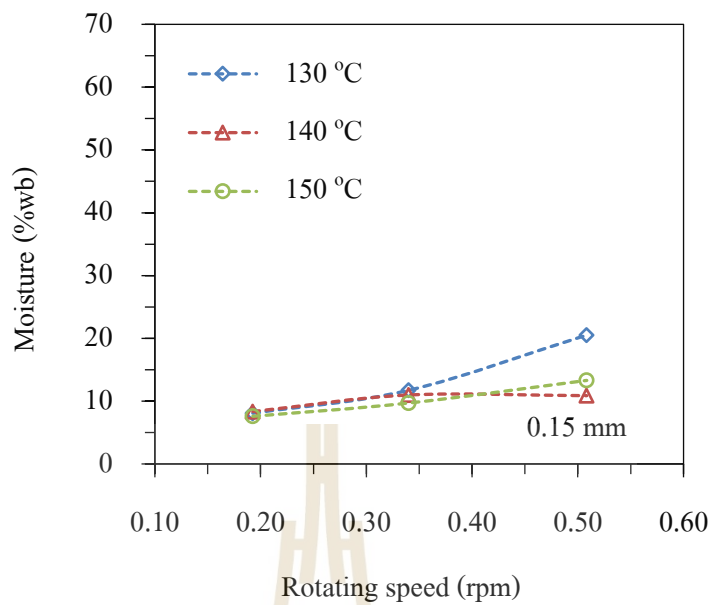
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์กับความถี่ของมอเตอร์

4.3 ผลการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

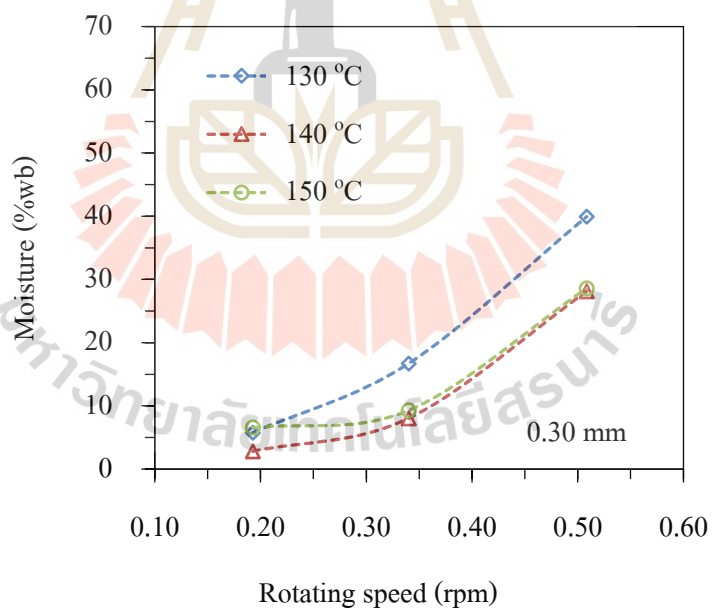
4.3.1 ความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลัง

จากผลการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่อุณหภูมิ 130 140 และ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 0.30 และ 0.50 mm และที่ความเร็วรอบของลูกกลิ้งที่ 0.19 0.34 และ 0.51 rpm นำไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS 14 พบว่า อุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง และความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งมีอิทธิพลต่อค่าความชื้นสุดท้าย SEC DR และ DC อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

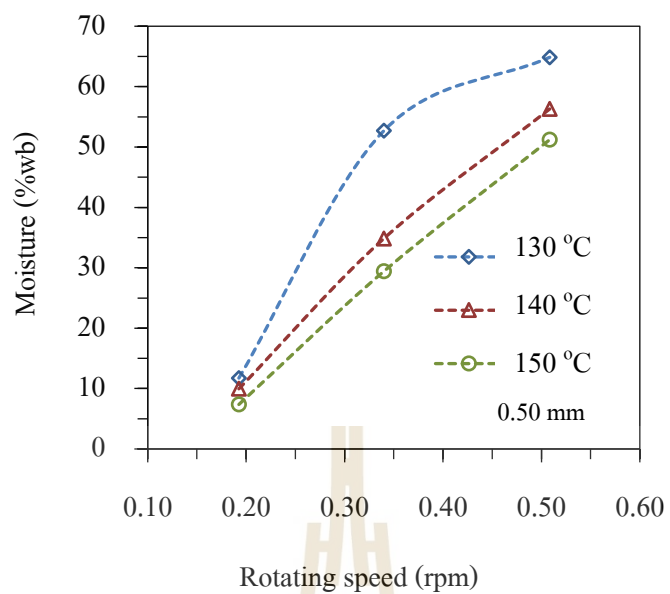
เมื่อพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิอบแห้งที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและความเร็วรอบเดียวกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชื้นลดลงเร็วขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.10 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (พรทิพย์ สุริยะจันทร์หอม และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์, 2560) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำแห้ง มอลโตเด็คซ์ทรินและกัมอะราบิกต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผงที่ผลิตโดยวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ระยะห่าง 0.15 mm และความเร็วรอบ 0.19 และ 0.34 rpm หากตัดค่าที่สภาวะอุณหภูมิ 150°C ความเร็วรอบ 0.19 rpm และ อุณหภูมิ 130°C ความเร็วรอบ 0.34 rpm แล้ว ความชื้นสุดท้ายที่อุณหภูมิต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4



(ก) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm



(ข) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm



(ค) ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

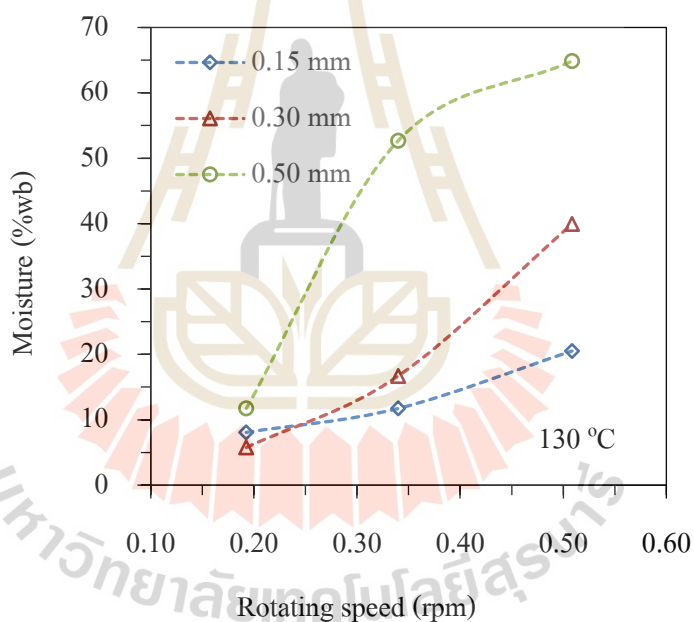
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังกับความเร็วยรอบการหมุนของลูกกลิ้งที่อุณหภูมิต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าความชื้นสุดท้าย อัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และความสามารถในการทำแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

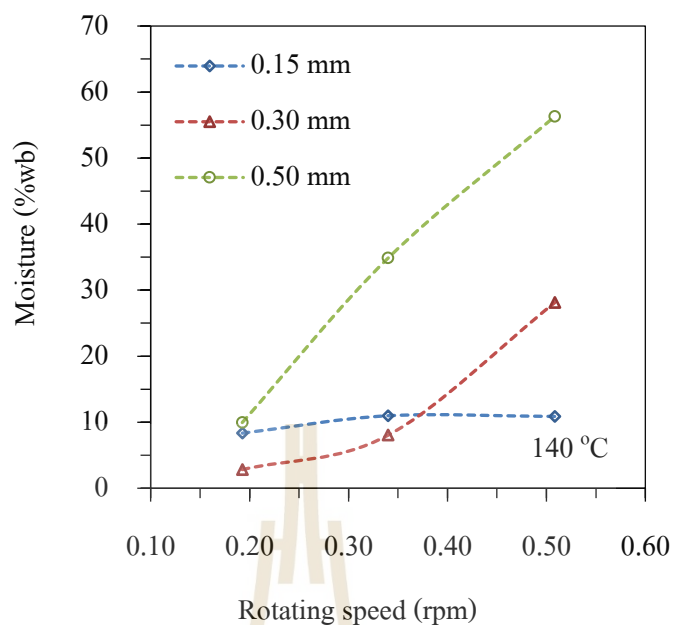
สภาวะการอบแห้ง	ความชื้นสุดท้าย (%)	SEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	DC (g/min)
0.15mm, 130°C, 0.19rpm	8.08 ^{bcd}	7.19 ^{lm}	0.88 ^a	17.52 ^a
0.15mm, 130°C, 0.34rpm	11.73 ^{cd}	6.09 ^{jk}	1.16 ^{ab}	23.35 ^{ab}
0.15mm, 130°C, 0.51rpm	20.52 ^f	4.90 ^{fgh}	1.46 ^{bc}	30.02 ^{bc}
0.15mm, 140°C, 0.19rpm	8.34 ^{bcd}	7.34 ^m	1.12 ^{ab}	22.35 ^{ab}
0.15mm, 140°C, 0.34rpm	10.97 ^{bcd}	5.50 ^{hij}	1.55 ^{bcd}	31.22 ^{bcd}
0.15mm, 140°C, 0.51rpm	10.87 ^{bcd}	4.92 ^{fgh}	1.77 ^{cd}	35.57 ^{cd}
0.15mm, 150°C, 0.19rpm	7.57 ^{abc}	7.18 ^{lm}	1.23 ^{ab}	24.59 ^{ab}
0.15mm, 150°C, 0.34rpm	9.70 ^{bcd}	5.20 ^{ghi}	1.89 ^{cde}	38.00 ^{cd}
0.15mm, 150°C, 0.51rpm	13.30 ^{de}	4.37 ^{def}	2.38 ^{ef}	48.04 ^{ef}
0.30mm, 130°C, 0.19rpm	5.76 ^{ab}	5.58 ^{hij}	1.85 ^{cd}	36.74 ^{cd}
0.30mm, 130°C, 0.34rpm	16.69 ^{ef}	4.26 ^{cdef}	2.64 ^{fg}	53.86 ^{fg}
0.30mm, 130°C, 0.51rpm	39.93 ⁱ	3.38 ^a	3.41 ^{ijk}	76.21 ^{jk}
0.30mm, 140°C, 0.19rpm	2.82 ^a	6.83 ^{lm}	1.59 ^{bcd}	31.44 ^{bcd}
0.30mm, 140°C, 0.34rpm	8.03 ^{bcd}	4.17 ^{bcde}	3.00 ^{fgh}	59.85 ^{gh}
0.30mm, 140°C, 0.51rpm	28.16 ^g	3.50 ^{abc}	3.83 ^{kl}	81.13 ^k
0.30mm, 150°C, 0.19rpm	6.55 ^{abc}	7.31 ^m	2.00 ^{de}	39.89 ^{de}
0.30mm, 150°C, 0.34rpm	9.28 ^{bc}	4.33 ^{def}	2.75 ^{fg}	55.10 ^{fg}
0.30mm, 150°C, 0.51rpm	28.61 ^g	4.27 ^{def}	3.31 ^{hij}	70.12 ^{ij}
0.50mm, 130°C, 0.19rpm	11.74 ^{cd}	4.77 ^{efg}	1.92 ^{cde}	38.61 ^{cd}
0.50mm, 130°C, 0.34rpm	52.69 ^{jk}	4.07 ^{abcde}	2.75 ^{fg}	67.46 ^{hi}
0.50mm, 130°C, 0.51rpm	64.86 ^l	3.56 ^{abc}	3.74 ^{jkl}	108.61 ^l
0.50mm, 140°C, 0.19rpm	9.96 ^{bcd}	5.76 ^{ij}	1.84 ^{cd}	36.77 ^{cd}
0.50mm, 140°C, 0.34rpm	37.85 ^h	3.74 ^{abcd}	2.85 ^{fgh}	61.77 ^{ghi}
0.50mm, 140°C, 0.51rpm	53.60 ^k	3.37 ^a	3.99 ^l	102.22 ^l
0.50mm, 150°C, 0.19rpm	7.37 ^{abc}	6.58 ^{kL}	1.88 ^{cde}	37.35 ^{cd}
0.50mm, 150°C, 0.34rpm	29.42 ^g	5.18 ^{ghi}	2.84 ^{fgh}	60.02 ^{gh}
0.50mm, 150°C, 0.51rpm	51.21 ^j	3.47 ^{ab}	4.51 ^m	108.61 ^l

- หมายเหตุ 1. อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$)
2. สภาพที่เป็นแถบสีเทาไม่สามารถทำการอบแห้งให้มีความชื้นสุดท้ายเหมาะสมกับการเก็บรักษาได้ (ความชื้นมากกว่า 14%)

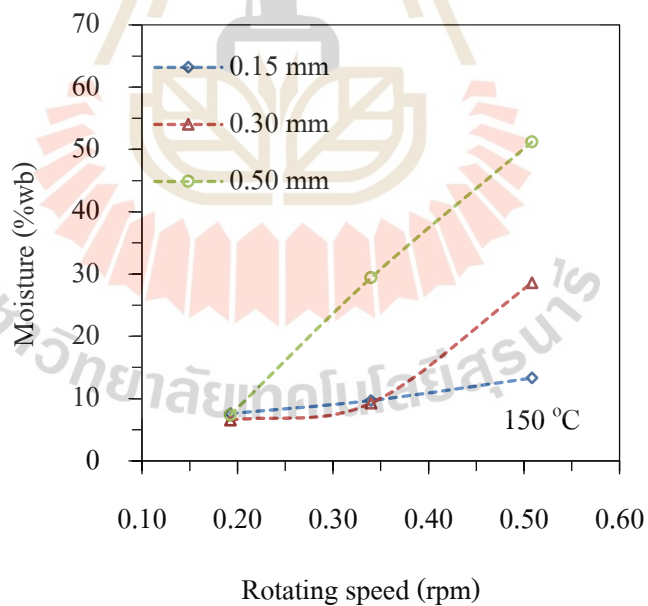
เมื่อพิจารณาเฉพาะระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งส่งผลให้ความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังมีค่าสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.11 ผลการทดลองมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการนำความร้อนของแผ่นฟิล์มสำหรับกระบวนการอบแห้ง (Qiu, Boom and Schutyser, 2020) เนื่องจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มของกากมันสำปะหลังหนาขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลทำได้ยากขึ้นจึงทำให้ความชื้นสูงขึ้น



(ก) อุณหภูมิในการอบแห้ง 130°C



(จ) อุณหภูมิในการอบแห้ง 140°C



(ค) อุณหภูมิในการอบแห้ง 150°C

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความเร็วยอบของลูกกลิ้งที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน

กากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งแล้วหากมีความชื้นต่ำกว่า 14% (รูปที่ 4.12 ก) มีลักษณะทางกายภาพหลังการอบแห้งเป็นผง หรือแผ่นบางกรอบสามารถเก็บรักษาและการจัดการเป็นกากมันอัดเม็ดและกากมันผงได้ง่าย ส่วนกากมันสำปะหลังที่มีความชื้นสูงกว่า 14% (รูปที่ 4.12 ข) มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนและไม่สามารถเก็บไว้นานเกิน 1 สัปดาห์เนื่องจากจะเกิดเชื้อราขึ้น



(ก) กากมันสำปะหลังมีความชื้นต่ำกว่า 14%

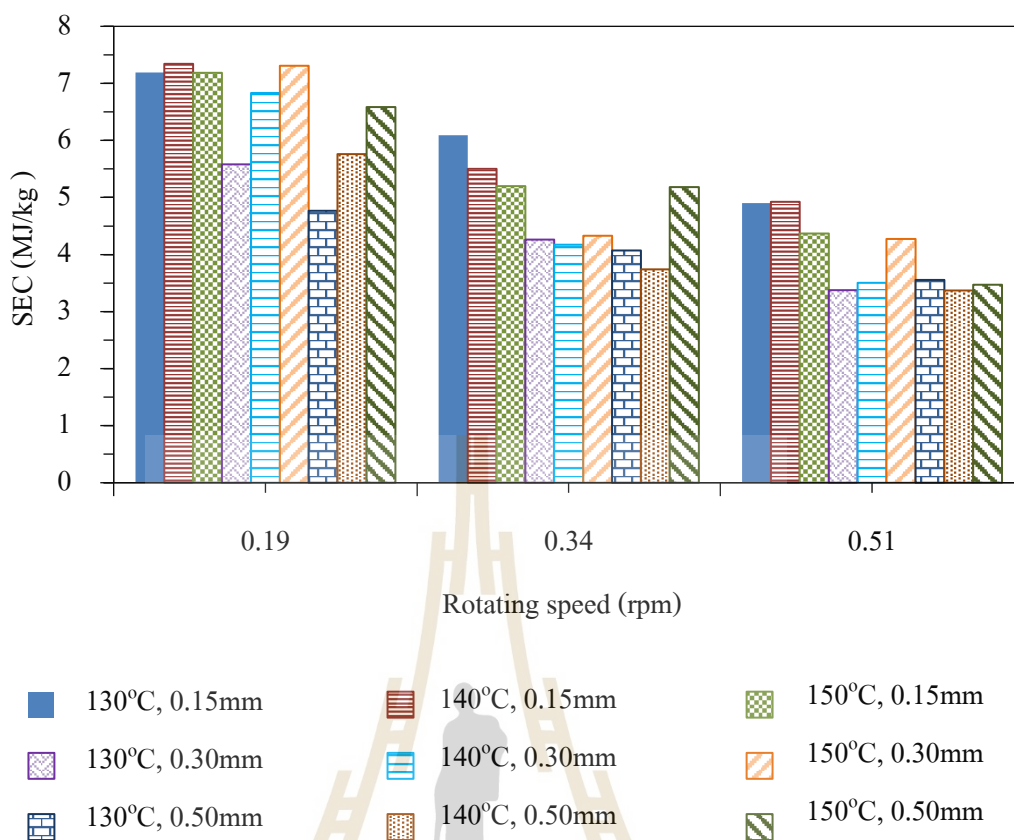


(ข) กากมันสำปะหลังมีความชื้นสูงกว่า 14%

รูปที่ 4.12 ลักษณะกากมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

4.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

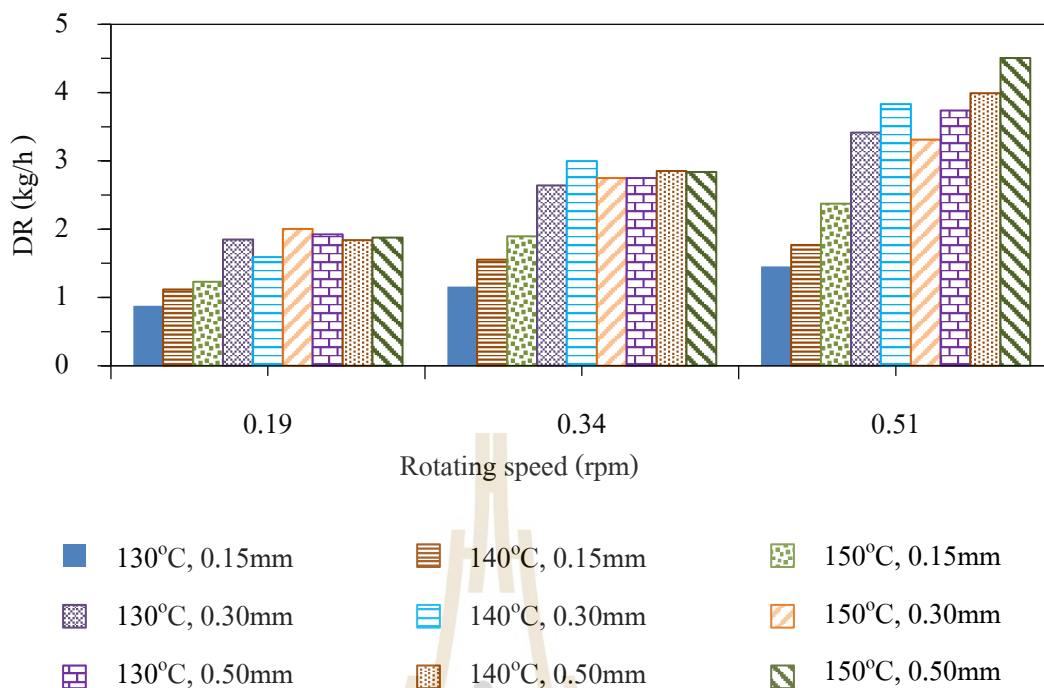
เมื่อพิจารณาด้านพลังงานในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะหรือ SEC พบว่าค่า SEC ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงร่วมกันของอุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง และความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.4 การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเนื่องจากความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานต่อปริมาณน้ำระเหยมีค่าลดลง ที่ความเร็วรอบ 0.19 rpm พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.3 และ 0.5 mm การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้งส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นต้องการพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์อินฟราเรดที่สูงขึ้น ส่วนที่ 0.15 mm พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อค่า SEC ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าลูกกลิ้งสามารถพาคากมันสำปะหลังไปบนลูกกลิ้งได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำจึงใช้เวลาในการอบแห้งรวมทั้งหมดสั้นกว่าเมื่อคิดเป็นค่า SEC แล้วจึงไม่แตกต่างกัน ที่ความเร็วรอบ 0.34 rpm พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงเนื่องจากระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มของกากมันสำปะหลังหนาขึ้นมีน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อผนวกกับค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำมีค่ามากขึ้น ซึ่งความหนาที่เพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 0.30 mm เป็นค่าที่ยังอยู่ในช่วงที่พลังงานความร้อนจากลูกกลิ้งสามารถระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้จนถึงระดับการเก็บรักษาที่ปลอดภัย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นถึง 0.5 mm จะไม่สามารถลดความชื้นกากมันสำปะหลังได้ถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาได้ และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ 0.51 rpm พบว่ามีค่า SEC ต่ำที่สุดเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งต่ำ อย่างไรก็ตามที่ความเร็วรอบนี้พบว่าสามารถอบแห้งให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นปลอดภัยได้ที่สภาวะระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm และอุณหภูมิการอบแห้ง 140 และ 150°C เท่านั้น ส่วนที่ความหนา 0.30 และ 0.50 mm ไม่สามารถทำให้กากมันสำปะหลังแห้งได้เนื่องจากทั้งความหนาของชั้นฟิล์มและความเร็วรอบหมุนที่เร็วขึ้นทำให้ไม่สามารถระเหยน้ำออกจากกากมันสำปะหลังได้ก่อนที่จะออกจากเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงถือได้ว่าที่ความหนา 0.30 และ 0.50 mm และความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 0.51 rpm ไม่เหมาะสมต่อการอบแห้งกากมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.13 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

4.3.3 อัตราการอบแห้ง

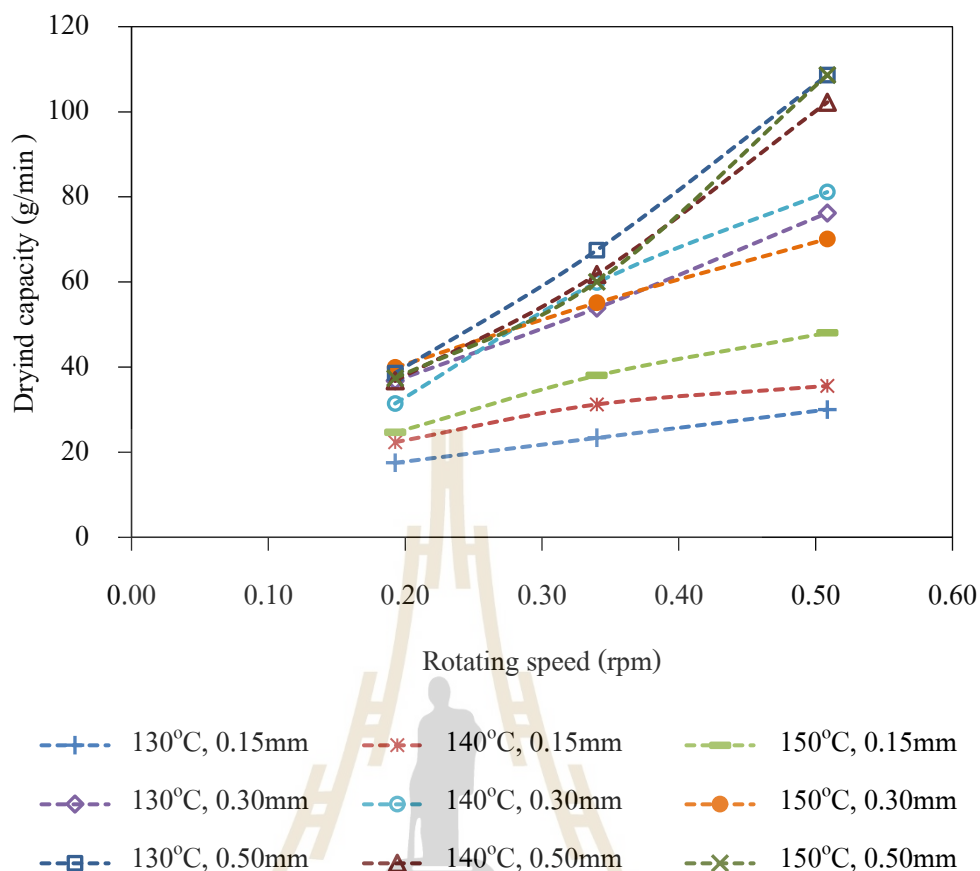
เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งพบว่าค่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงร่วมกันของอุณหภูมิ ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและความเร็วรอบการหมุนลูกกลิ้งแสดงดังรูปที่ 4.14 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งอบแห้งส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทมวลได้มากขึ้น ส่วนความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการระเหยลดลงทำให้ออบแห้งเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นถึง 0.51 rpm ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 และ 0.50 mm จะไม่สามารถลดความชื้นกากมันสำปะหลังได้ถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาได้ และเมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งสูงสุดที่สามารถอบแห้งให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นอยู่ในระยะปลอดภัยได้คือ ที่ความเร็วรอบ 0.34 rpm อุณหภูมิอบแห้ง 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm



รูปที่ 4.14 อัตราการอบแห้งของกากมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

4.3.4 ความสามารถในการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลังพบว่าค่าความสามารถในการอบแห้งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้ง และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ดังแสดงดังรูปที่ 4.15 การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้งทำให้การนำกากมันสำปะหลังเข้าสู่ห้องอบแห้งได้เร็วขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทำให้กากมันสำปะหลังเกาะติดเป็นฟิล์มหนาขึ้นส่งผลให้ป้อนกากมันสำปะหลังเข้าสู่เครื่องอบแห้งได้มากขึ้น ที่ความเร็วรอบ 0.19 และ 0.34 rpm พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.3 mm กับ 0.5 mm ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนที่ความเร็วรอบการหมุนของลูกกลิ้ง 0.51 rpm ให้ความสามารถสูงสุดในการทำแห้งแต่ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 0.30 mm และ 0.50 mm ไม่สามารถอบแห้งกากมันสำปะหลังให้อยู่ในระยะปลอดภัยได้ และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบที่ 0.34 rpm พบว่าสามารถอบแห้งให้กากมันสำปะหลังมีความชื้นปลอดภัยได้ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm อุณหภูมิ 140 และ 150°C เท่านั้น โดยที่อุณหภูมิการอบแห้งไม่ส่งผลต่อความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.15 ความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการอบแห้งร่วมกันทั้งความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลัง ค่า SEC DR และ DC แล้ว พบว่าค่าความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังเป็นค่าที่มีความสำคัญต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากความชื้นสุดท้ายของกากมันสำปะหลังให้อยู่ในระยะปลอดภัยต่อการเก็บรักษาที่ความชื้นต่ำกว่า 14 % ร่วมกับค่า SEC DR และ DC แล้วจากตารางที่ 4.4 พบว่าที่สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm ความเร็วรอบ 0.34 rpm นั้นมีค่าความชื้นสุดท้ายที่ 8.03% ค่า SEC เท่ากับ 4.17 MJ/kg ค่า DR 3.00 kg/h และให้ค่าความสามารถในการอบแห้งกากมันสำปะหลังเข้าเครื่องอบแห้งสูงสุดที่ 59.85 g/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุนของ วิเชียร ดวงสีเสน และคณะ (2556) พบว่าที่สภาวะการอบแห้งนี้สามารถลดการใช้พลังงานในการระเหยน้ำออกจากกรรมมันสำปะหลังต่อกิโลกรัมลงได้ 25.80%

ค่า SEC เป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้กับเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังสามารถบอกประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ได้ โดยคิดเฉพาะค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทมวลความชื้นของกากมันสำปะหลังเท่านั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2 (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2554)

$$\eta'_{\text{dry}} = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_s}{Q_a} \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ η'_{dry} คือประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

Q_{evap} คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)

Q_s คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)

Q_a คือปริมาณความร้อนที่ผิวของลูกกลิ้งอบแห้งได้รับ (kJ)

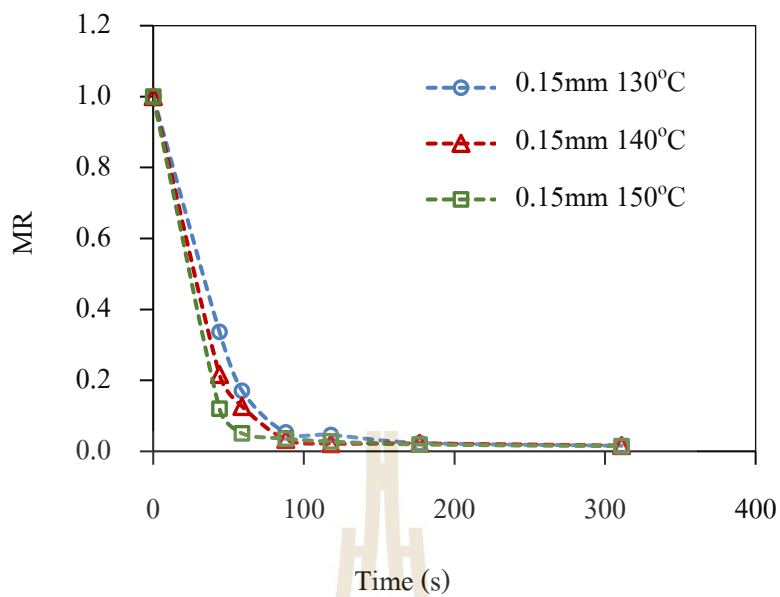
$$\eta'_{\text{dry}} = \frac{270.70+181.75}{813.37} \times 100$$

$$\eta'_{\text{dry}} = 55.62\%$$

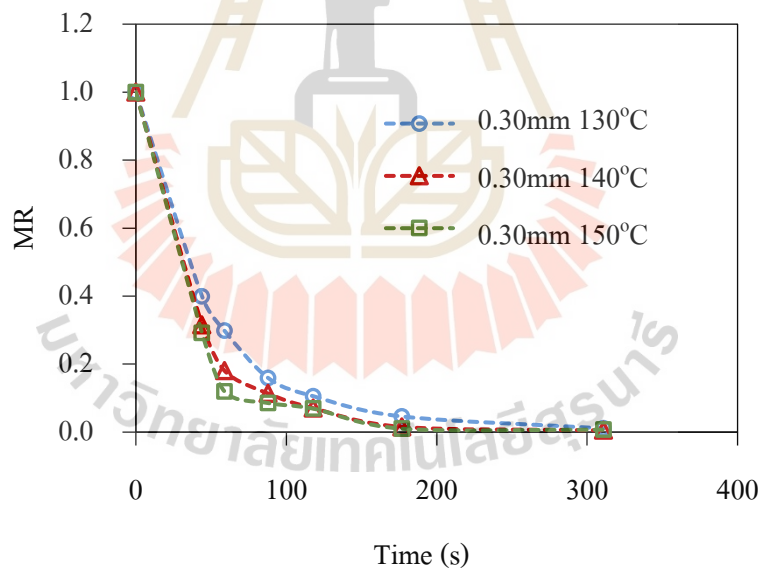
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลังแสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ภาคผนวก ข. มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 55.62%

4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

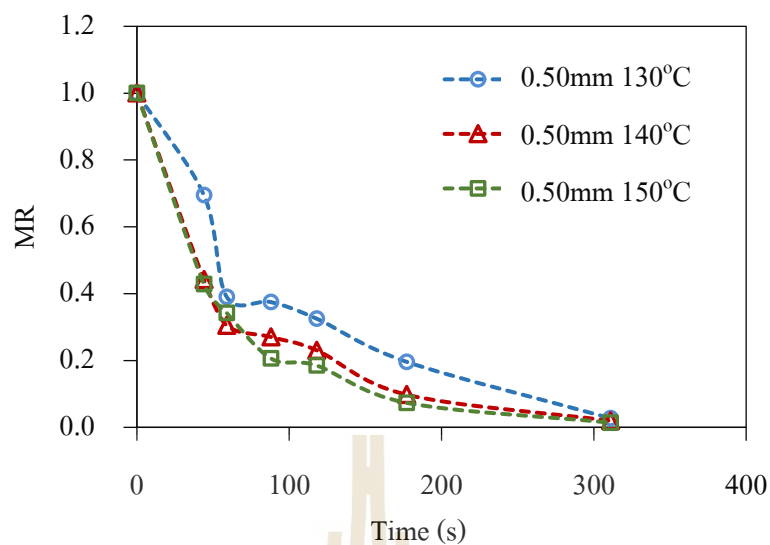
จากการทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งพบว่า พฤติกรรมการลดลงของความชื้นมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยพฤติกรรมการอบแห้งส่วนใหญ่ อยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง และพบว่าอัตราการลดลงของความชื้นกากมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (ความหนาของกากมันสำปะหลัง) เมื่อพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิอบแห้งที่ความหนาของกากมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความชื้นในกากมันสำปะหลังลดลงเร็วขึ้น เห็นได้ว่าความชื้นของกากมันสำปะหลังลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระดับความชื้นประมาณหนึ่ง เนื่องจากเมื่อกากมันสำปะหลังสัมผัสกับพื้นผิวลูกกลิ้งอบแห้ง น้ำบนผิวของกากมันสำปะหลัง จะระเหยออกไปเมื่อได้รับความร้อน และเมื่ออบแห้งต่อไปความชื้นของกากมันสำปะหลังลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเซลล์ของกากมันสำปะหลังจะเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวของกากมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งเช่น การสร้างแบบจำลองทางจลน์ของการย่อยสลายสารประกอบฟีนอลิก (phenolic) ของเปลือกแอปเปิ้ลด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วตามด้วยการลดลงอย่างช้า ๆ เป็นเวลานานจนถึงระดับคงที่ (ช่วงสุดท้ายนี้เรียกว่า ช่วงการอบแห้งลดลง) (Henríquez, Córdova, Almonacid and Saavedra, 2014)



(ก) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm



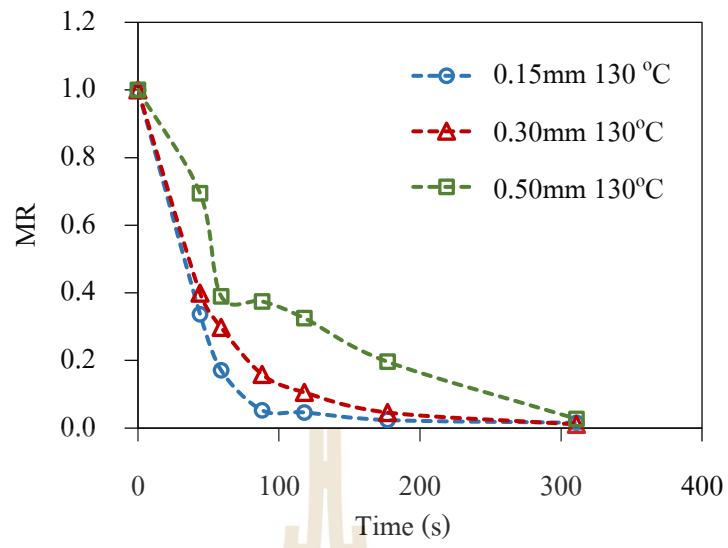
(ข) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm



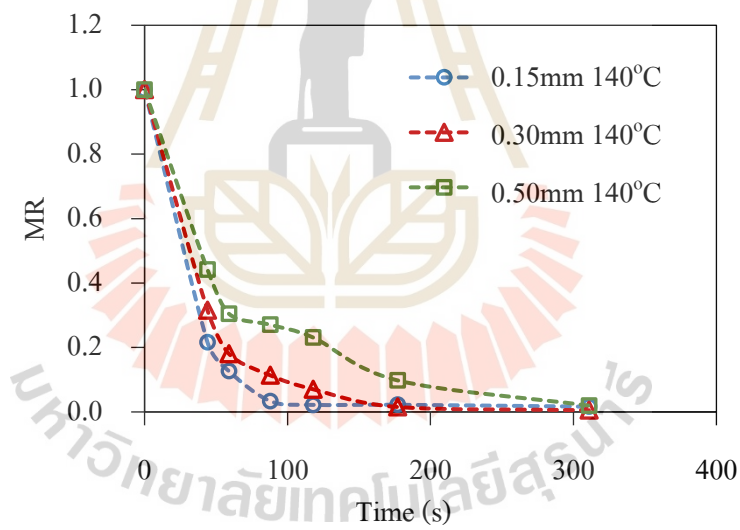
(ค) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งแตกต่างกัน

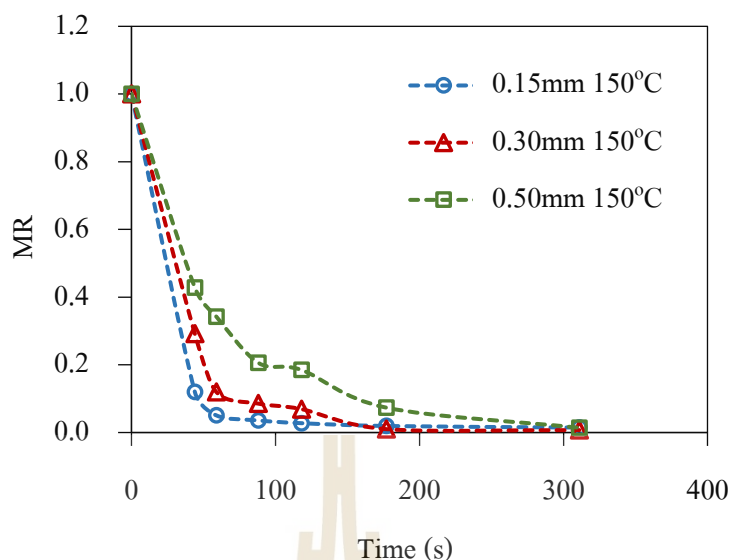
เมื่อพิจารณาเฉพาะระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (ความหนาของกากมันสำปะหลัง) พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันการเพิ่มขึ้นของความหนากากมันสำปะหลังส่งผลให้ความชื้นของกากมันสำปะหลังสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากความหนาของฟิล์มที่จับอยู่บนพื้นผิวของลูกกลิ้ง มีค่ามากขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนและการส่งผ่านความชื้นผ่านผิวฟิล์มหนาทำได้ยากกว่าแผ่นฟิล์มบางความชื้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจลนพลศาสตร์การนำความร้อนของแป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch) แบบฟิล์มบาง พบว่าการระเหยของน้ำบนฟิล์มบางทำได้ง่ายกว่าฟิล์มหนาโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (Karapantsios, 2006)



(ก) ที่อุณหภูมิ 130°C



(ข) ที่อุณหภูมิ 140°C



(ค) ที่อุณหภูมิ 150°C

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแตกต่างกัน

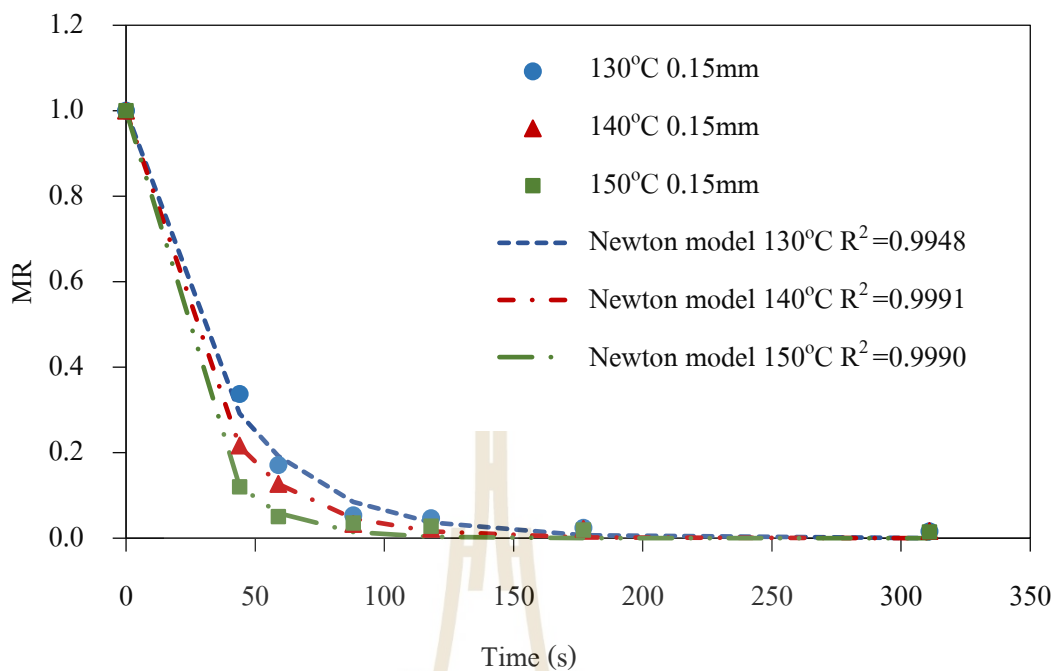
4.4.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Newton and Page โดยความสามารถของแบบจำลองในการทำนายความชื้นของกากมันสำปะหลังมีดัชนีบ่งชี้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 และ ค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังจากรูปที่ 4.18 และ 4.19 เป็นไปตามกฎของข้อที่ 2 ของ Fick และแบบจำลองการกระจายตัวผิดปกติเหมาะสมกับการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานาน ($MR_t < 0.6$) ผลการนำเสนอแบบจำลองที่แตกต่างกันของ 2 โมเดลโดยที่แบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากมันสำปะหลังได้ดีโดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.9568-0.9994 ซึ่งมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Newton และ ค่า RMSE มีค่า 0.0078-0.0623 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองของ Newton แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Page มี

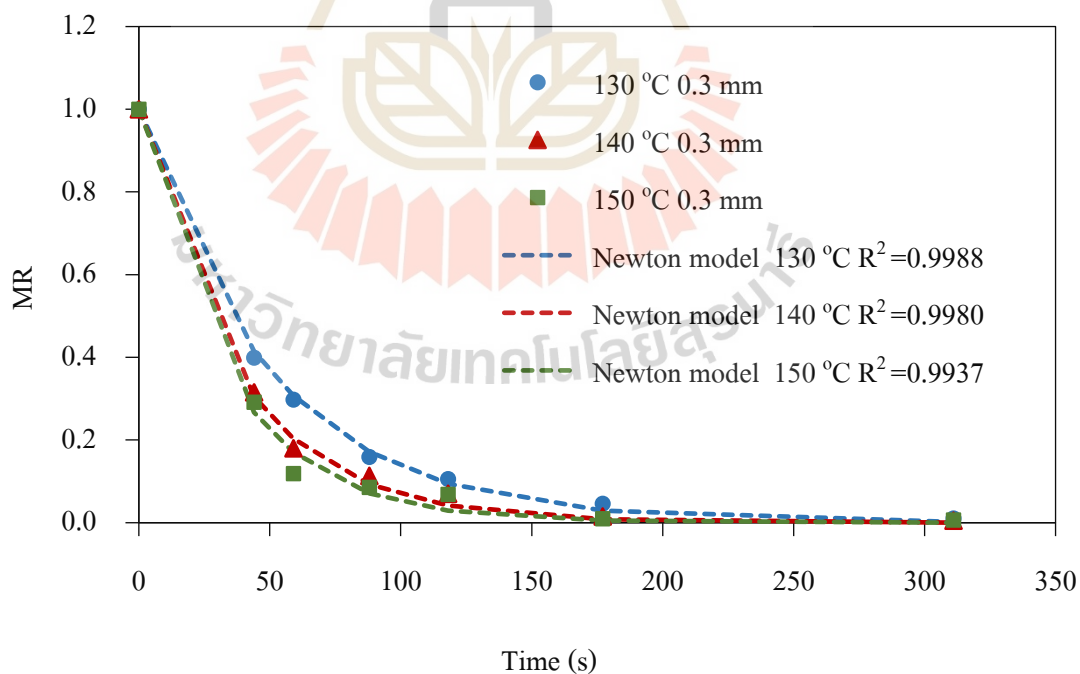
ประสิทธิภาพสูงในการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำและมีค่าความผิดพลาดต่ำ

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่การอบแห้งแบบชั้นบางและค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

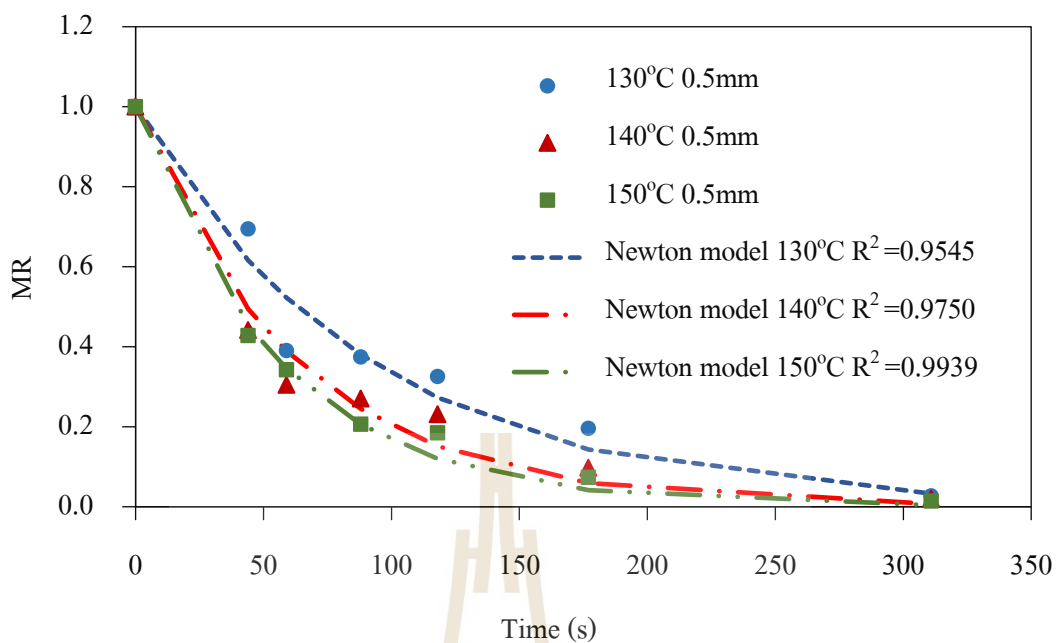
Distance (mm)	Temperature (°C)	Newton			Page			
		k	R ²	RMSE	k	n	R ²	RMSE
0.15	130	0.028	0.9948	0.0243	0.007	1.353	0.9986	0.0198
	140	0.035	0.9991	0.0111	0.030	1.038	0.9992	0.0111
	150	0.048	0.9990	0.0155	0.282	0.548	0.9989	0.0119
0.3	130	0.020	0.9988	0.0119	0.029	0.914	0.9994	0.0078
	140	0.027	0.9980	0.0168	0.044	0.873	0.9981	0.0142
	150	0.030	0.9937	0.0269	0.044	0.907	0.9937	0.0266
0.5	130	0.011	0.9545	0.0647	0.018	0.888	0.9568	0.0623
	140	0.016	0.9750	0.0515	0.068	0.670	0.9918	0.0272
	150	0.018	0.9939	0.0294	0.045	0.780	0.9979	0.0142



(ก) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm

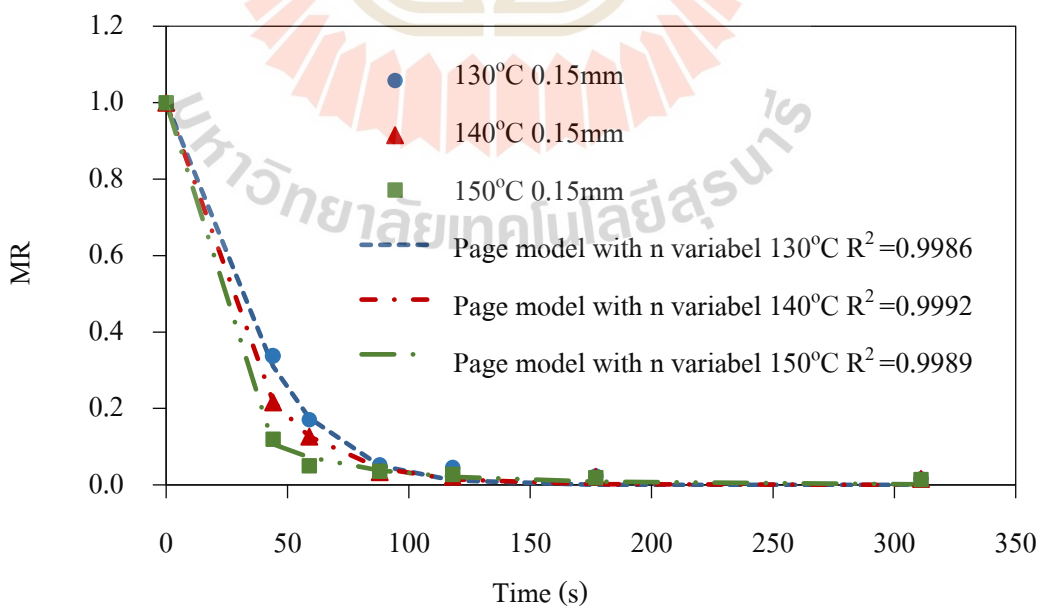


(ข) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm

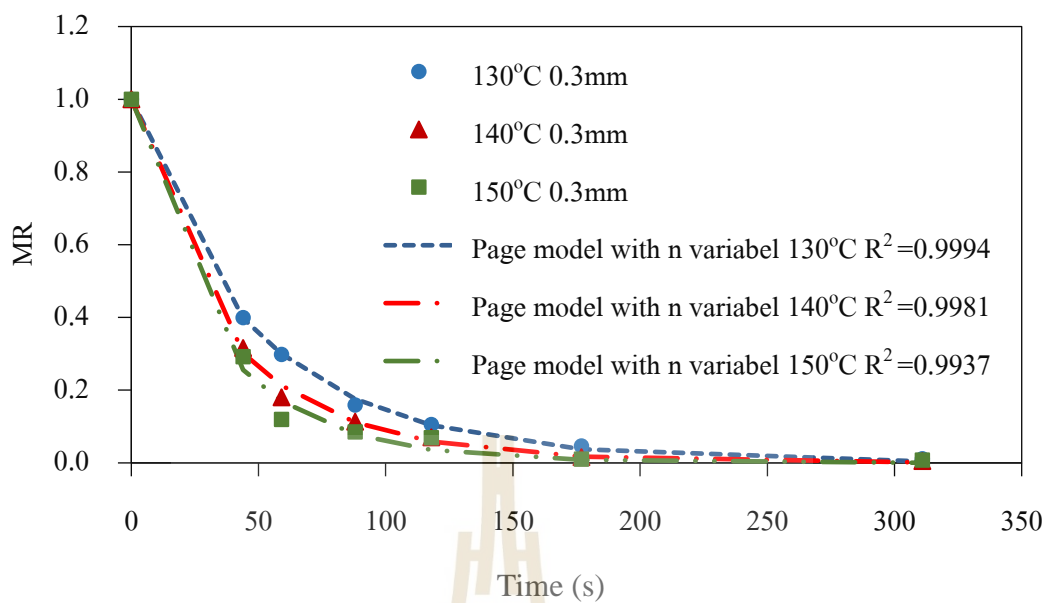


(ค) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

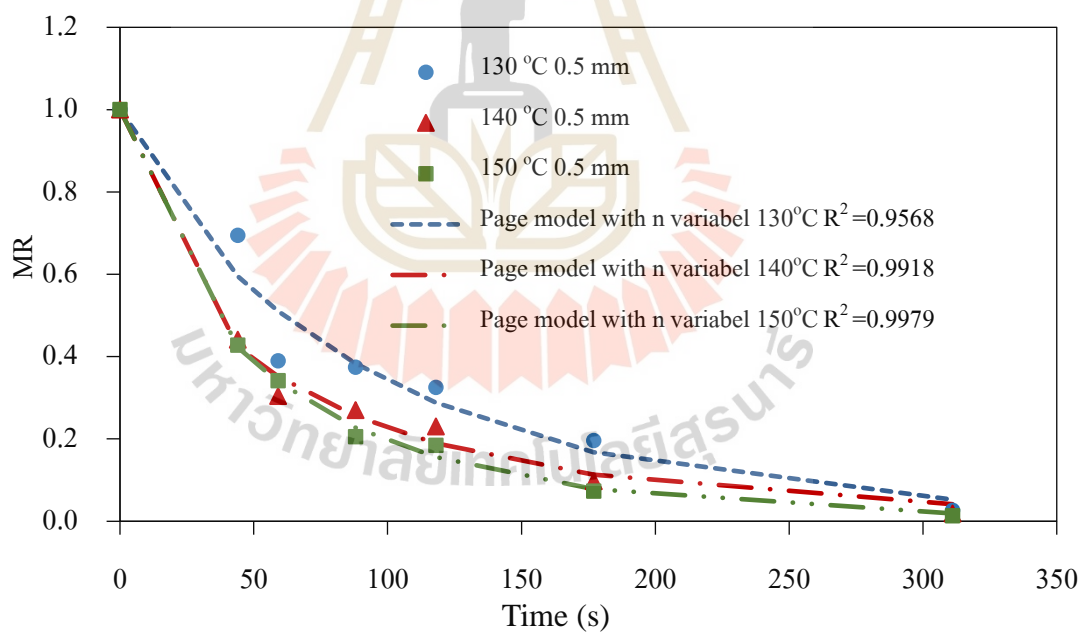
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของกากมันสำปะหลังกับเวลาในการอบแห้ง
เปรียบเทียบกับแบบจำลองของนิวตันที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งแตกต่างกัน



(ก) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm



(ก) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm



(ข) ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งที่ระยะลูกกลิ้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Page

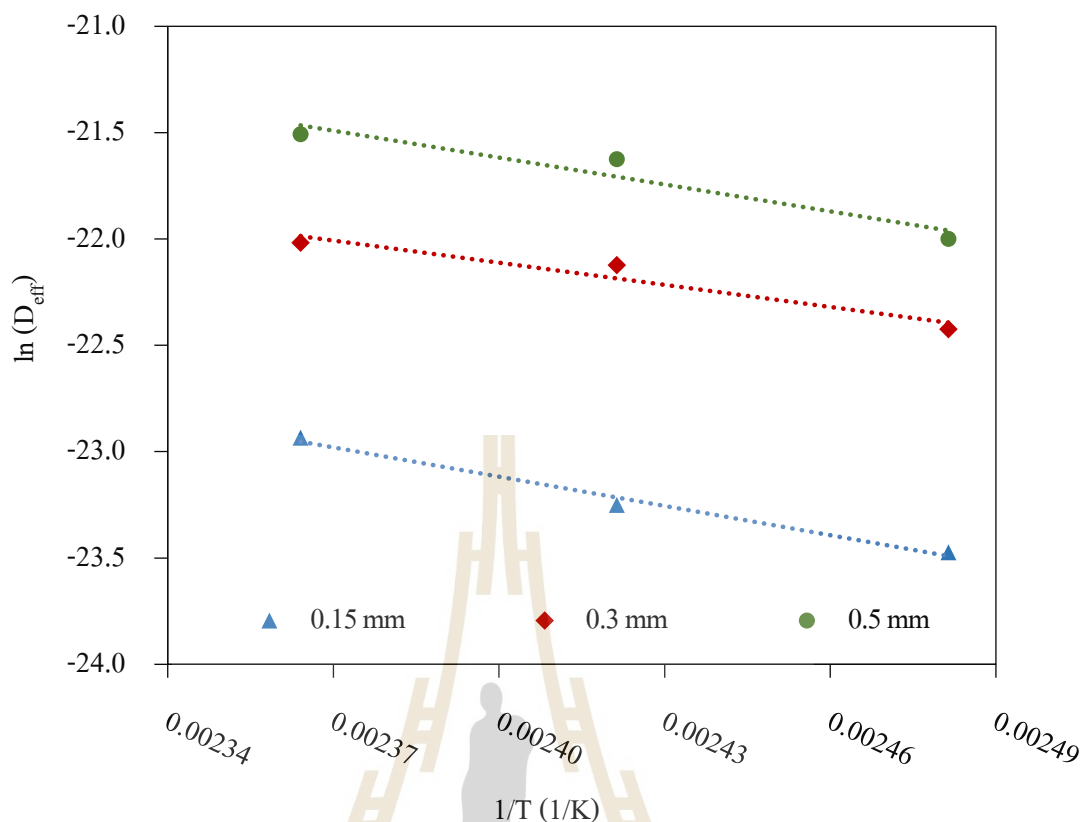
4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130 140 และ 150°C แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งเป็นตัวเร่งอัตราการระเหยของน้ำที่ผิว และมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงสร้างที่มาเดิมบริเวณผิวหน้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทมวลสารในการแพร่กระจายตัวของความชื้นสู่ผิววัสดุ ค่าระยะห่างของลูกกลิ้งที่ 0.15 0.30 และ 0.50 mm พบว่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น เนื่องจากความหนาของฟิล์มกากมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณของเหลวที่อยู่ในกากมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของของเหลว (ความชื้น) ระหว่างผิวหน้ากับของเหลวที่มีอยู่ในกากมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้นด้วยทำให้เกิดการถ่ายเทมวลจากที่มีความชื้นสูงไปยังที่มีความชื้นต่ำได้ง่ายขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของกากมันสำปะหลัง

Temperature °C	D _{eff} value at each thickness (m ² /s)		
	0.15 mm	0.30 mm	0.50 mm
130	0.64×10^{-10}	1.83×10^{-10}	2.79×10^{-10}
140	0.80×10^{-10}	2.47×10^{-10}	4.06×10^{-10}
150	1.10×10^{-10}	2.74×10^{-10}	4.56×10^{-10}

ค่าพลังงานกระตุ้น จากผลการทดลองค่าพลังงานกระตุ้นคำนวณจากความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการอาร์เรเนียส แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งที่ 0.15 0.30 และ 0.50 mm มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ที่ 26.76×10^3 27.48×10^3 และ 31.91×10^3 J/mol ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Rizvi (1986) ที่ระบุว่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งวัสดุอาหารและผลผลิตทางการเกษตรจะมีค่าอยู่ในช่วง 15.00×10^3 - 40.00×10^3 J/mol



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับ $1/T$ (1/K) เมื่ออบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 130-150°C

4.4.3 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างกากมันสำปะหลัง โดยวิเคราะห์ปริมาณ เถ้า โปรตีน ไขมัน ไฟเบอร์ และแป้ง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.7 เมื่อมาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแตกต่างกับกากมันสำปะหลังที่ไม่ได้รับความร้อนในการทำแห้ง พบว่าการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งที่พัฒนาขึ้นที่อุณหภูมิ 130 140 และ 150°C ค่าของ เถ้า และไขมัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าของโปรตีนพบว่าที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้โปรตีนเปลี่ยนรูปส่งผลให้เกิดการย่อยที่ง่ายกว่า และค่าของแป้งพบว่าเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นมีค่าลดลงเนื่องจากความร้อนทำให้โครงสร้างของแป้งเปลี่ยนเป็นแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่าเส้นใยอาหาร ส่งผลให้ไฟเบอร์ในกากมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นมีปริมาณไฟเบอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาพลังงานของแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์พบว่าแป้งสามารถยับยั้งการย่อยเพื่อไม่ให้เอนไซม์ย่อยไปเป็นพลังงานได้ (Ranhotra, Gelroth and Glaser, 1996)

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง

Condition	Property (%)				
	Ash	Protein	Fat	fiber	Starch
Cassava pulp	2.248±0.56 ^a	2.005±0.08 ^a	0.233±0.06 ^a	34.149±0.83 ^a	61.363±0.12 ^b
Drum dry 130°C	3.319±0.35 ^a	2.005±0.04 ^a	0.223±0.16 ^a	36.881±0.47 ^b	57.570±0.38 ^a
Drum dry 140°C	3.273±0.62 ^a	2.113±0.01 ^a	0.229±0.05 ^a	37.519±0.26 ^b	56.863±0.70 ^a
Drum dry 150°C	3.146±0.41 ^a	2.267±0.01 ^b	0.197±0.07 ^a	37.939±0.29 ^b	56.449±0.36 ^a

a-b ตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันบ่งบอกถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p < 0.05)

4.5 ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ

ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ๆ ได้แก่ เทวรัตน์ และคณะ (2556) ออบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน วิเชียร ดวงสีแสน (2556) ออบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งตะแกรงหมุน และกลวัชร ทิมินกุล (2558) ศึกษาและออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังแบบลูกกลิ้งคู่ ที่ได้มีการประเมินสมรรถนะการอบแห้งได้แก่ ค่าพลังงานความร้อนจำเพาะในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง ปริมาณการอบแห้ง และขนาดของเครื่องอบแห้ง แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะและรูปแบบการอบแห้งกากมันสำปะหลัง

สมรรถนะ	เทวรัตน์ (2556)	วิเชียร (2556)	กลวัชร (2558)	เกียรติศักดิ์ (2563)
พลังงานความร้อนจำเพาะ (MJ/kg)	5.76	5.62	-	4.17
ปริมาณการอบแห้ง (kg/h)	100	26	24	3.6
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)	10	1	1	1
ขนาดของห้องอบแห้ง (m ³)	11	0.5	0.00024	0.000064
ลักษณะการอบแห้ง	แบบกะ	แบบกะ	แบบต่อเนื่อง	แบบต่อเนื่อง

4.6 ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลัง

จากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลังที่แสดงในตาราง ผนวก ก.23 สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ ของการคำนวณแสดงดังภาคผนวก จ. จากการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ตามเงื่อนไขที่กำหนดพบว่า มีค่าใช้จ่ายรวมเป็นการลงทุนรายปีประกอบไปด้วยเงินลงทุนในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ เงินค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง ค่าวัสดุในการอบแห้ง (กากมันสำปะหลัง) ค่าพลังงานในการอบแห้ง ค่าแรงงาน และมูลค่าซากเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ รวมเป็นเงินลงทุนรายปี 138,701 บาท ผลตอบแทนจากการขายกากมันสำปะหลังรายปี 9,547 บาท เมื่อนำไปใช้ในเชิงธุรกิจมีระยะเวลาคืนทุน 14 ปี ซึ่งยังไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีความชื้นสูง จึงต้องใช้พลังงานสูงในการระเหยน้ำ และกากมันสำปะหลังเป็นขยะเหลือทิ้งจากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังทำให้มีมูลค่าต่ำจากราคาคืนทุนที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลังพบว่าต้นทุนส่วนใหญ่เป็นค่าแรงงาน 93,600 บาท/ปี และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง 23,961 บาท/ปี เนื่องด้วยเครื่องอบแห้งเป็นเครื่องอบแห้งต้นแบบสามารถขยายมาตราส่วน เพื่อเพิ่มปริมาณการอบแห้งกากมันสำปะหลังได้อีกทั้งด้วยหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งนำเข้าไปติดตั้งกับกระบวนการที่กากมันสำปะหลังจึงไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง ส่วนค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งสามารถเลือกใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ ประกอบกับกากมันสำปะหลังเป็นขยะอุตสาหกรรมมีปริมาณมากทำให้โรงงานอุตสาหกรรมมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากมันสำปะหลังหากไม่นำกากมันสำปะหลังไปใช้ให้เกิดประโยชน์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) สมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของกากมันสำปะหลังที่ออกจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 84.55% (w.b.) มีความหนาแน่นเฉลี่ยที่ 1050 kg/m³ แรงเฉือนสูงสุดและความหนืดของกากมันสำปะหลังสามารถใช้เครื่องมือวัดความหนืดแบบใบพัดหมุน (Rotational viscometer) ได้ โดยกากมันสำปะหลังมีค่าแรงเฉือนสูงสุด 6,968.66 Pa และค่าความหนืดของกากมันสำปะหลัง 379.92 Pa.s นอกเหนือจากกากมันสำปะหลังแล้วเครื่องมือวัดความหนืดแบบใบพัดหมุน (Rotational viscometer) ที่นำเสนอยังใช้ได้กับวัสดุอื่น ๆ ได้

2) เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่สำหรับอบแห้งกากมันสำปะหลังที่ทำการพัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย ลูกกลิ้ง 1 คู่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 26.5 cm และยาว 60 cm สามารถปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งอบแห้ง 0.1 - 6 mm ใบมีดชุดผลิตภัณฑ์แห้งออกจากลูกกลิ้ง ฮีตเตอร์อินฟราเรดสามารถตั้งค่าอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 37 - 170°C มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการหมุนลูกกลิ้งควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ ความเร็วรอบของลูกกลิ้งอบแห้งอยู่ระหว่าง 0.19-1.36 rpm การทำงานของเครื่องอบแห้งทำการป้อนกากมันสำปะหลังด้านบนระหว่างลูกกลิ้ง เมื่อลูกกลิ้งหมุนจะพาทากมันสำปะหลังเคลือบลูกกลิ้งเป็นฟิล์มบาง เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิวของลูกกลิ้งไปยังฟิล์มของกากมันสำปะหลังด้วยการนำความร้อน เมื่อลูกกลิ้งหมุนไปจนถึงใบมีดจะทำการขูดกากมันสำปะหลังออกมาเป็นแผ่นบางหรือผงตกลงภาชนะรองรับด้านล่าง

3) การอบแห้งกากมันสำปะหลังจากการทดลองการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งทำการอบแห้งกากมันสำปะหลัง พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 140°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm ความเร็วรอบ 0.34 rpm เป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด กากมันสำปะหลังแห้งที่ได้มีความชื้นสุดท้าย 8.03% (w.b.) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 4.17 MJ/kg อัตราการอบแห้ง 3.00 kg/h และความสามารถในการทำแห้ง 59.85 g/min

4) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งมากที่สุด

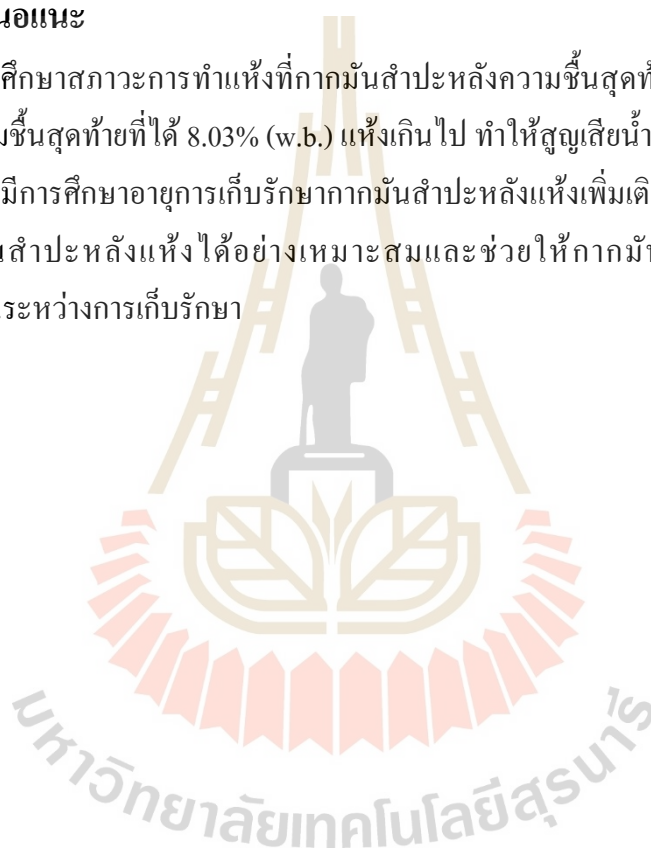
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (D_{eff}) ของการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 140 และ 150°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 0.3 และ 0.5 mm มีค่าอยู่ในช่วง 0.64×10^{-10} - 4.56×10^{-10} m²/s และค่าพลังงานกระตุ้นที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 0.3 และ 0.5 mm มีค่าเท่ากับ 38.13 28.84 และ 35.04 kJ/mol ตามลำดับ

5) องค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลังพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่ 130 140 และ 150°C ไม่ส่งผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีกายภาพมีค่าลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาสภาวะการทำแห้งที่กากมันสำปะหลังความชื้นสุดท้ายที่ 14% (w.b.) เพิ่มเติม เนื่องจากที่ความชื้นสุดท้ายที่ได้ 8.03% (w.b.) แห้งเกินไป ทำให้สูญเสียน้ำหนักของน้ำ

2) ควรมีการศึกษาอายุการเก็บรักษากากมันสำปะหลังแห้งเพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางในการจัดเก็บกากมันสำปะหลังแห้งได้อย่างเหมาะสมและช่วยให้กากมันสำปะหลังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา



รายการอ้างอิง

- กลวัชร ทิมีนกุล, พินิจ จิรัคคกุล, วุฒิพล จันทร์สระคู, มงคล ตุ่นเฮ้า, ประยูร จันทร์ทองอ่อน, ธนกฤต โยธาทูล. (2558). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ การศึกษาและออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังแบบลูกกลิ้งคู่. กรมวิชาการเกษตร.
- เกียรติศักดิ์ ใจโต, เทวรัตน์ ตรีอำรรค, กระวี ตรีอำรรค, นาฏชนก ปรางปรุ. (2559). การอบแห้งมะพร้าวด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบคสำหรับการผลิตน้ำมันมะพร้าวด้วยวิธีบีบเย็น. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 22(1), 64-72
- จิรรัตน์ ทัดติยกุล. (2554). วิทยาการกระแสของอาหาร. ตำราเรียน. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี. (2536). การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 133 น.
- ศิรพันธ์ เอกสมทราเมษฐ์. (2551). การใช้ประโยชน์จากเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2552). การทำแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. เอกสารประกอบการสอน สาขา วิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2554). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ การศึกษาด้านแบบการลดความชื้นกากมันสำปะหลังโดยใช้ระบบอบแห้งแบบโรตารี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2556). รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์การพัฒนากระบวนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มมูลค่า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นฤดี พงศ์กิจวิฑูร. (2542). ปัจจัยการผลิตกล้วยหอมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 130 น.

- นักสิทธิ์ คุ้มพัฒนาชัย. (2526). การถ่ายเทความร้อน. ตำราเรียน. ฟิสิกส์เซนต์เตอร์.
- นาฏชนก ปรางปรุ, วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, เกียรติศักดิ์ ใจโต. (2556). การทำแห้งกากมันสำปะหลังด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. **ประชุมวิชาการวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6**, 382-386
- พรทิพย์ สุริยะจันทร์หอม และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. (2560). ผลของอุณหภูมิการทำแห้ง มอลโตเด็กซ์ตรินและกัมอะราบิกต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผงที่ผลิตโดยวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10**
- มนตรี พิรุณเกษตร. (2545). การถ่ายเทความร้อน. ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. วิทยพัฒน์.
- รตินันท์ เหลือมพล, สิริธร สุภาการ, สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ และอภิชาติ อางนาเสียว. (2016). สมการการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ. **วารสารวิจัย มข**, 16(2), 1-14
- วิเชียร ดวงสีเสน. (2555). การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, นัยวัฒน์ สุขทั้ง, วีรชัย อางหาญ. (2556). การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 19(1), 7-13
- สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง. (2561). สถิติข้อมูลส่งออกกากมันสำปะหลัง. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกกากมันสำปะหลังของประเทศไทยปี 2560-2561. สืบค้นเมื่อ วันที่ 10 สิงหาคม 2561, จาก <http://thaitapioca.org/2018>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตรของประเทศไทย. มันสำปะหลัง. เนื้อที่ ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายจังหวัด ปี 2548-2550. สืบค้นเมื่อ วันที่ 11 กรกฎาคม 2563, จาก [http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/casava62\(1\).pdf](http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/casava62(1).pdf)
- สุระ ดันดี, ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์, โชติชวาล ชัยชวีวิบูลย์, อนุชา สมพงษ์. (2553). คุณลักษณะของการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง. **โครงการประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรม ครั้งที่ 1**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

- สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อัมพวัน ตันสกุล. (2551). สมบัติทางวิศวกรรมของอาหารและวัสดุชีวภาพ. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Adebayo, A.O., Lateef, S.O. and Elizabeth, A.B. (2010). Physicochemical, Rheological and Consumer acceptability of cassava starch salad cream. **Journal of American Science**, 6(1), 65-72.
- Ademiluyi, F.T., Abowei, M.F.N., Puyate, Y.T. and Achinewhu, S.C. (2010). Effects of drying parameters on heat transfer during drying of fermented ground cassava in a rotary dryer. **Drying Technology**, 28(4): 550-561.
- Afzal, T.M. and Abe, T. (1998). Diffusion in potato during far infrared radiation drying. **Journal of food engineering**, 37(4), 353-365.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (2000). **Official Methods of Analysis**, 17th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland, 2000.
- Balamurugan, T. and Anbuselvi, S. (2013). Physicochemical characteristics of Manihot esculenta plant and its waste. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, 5(2), 258-260.
- Brummer, R. (2006). **Rheology Essentials of Cosmetic and Food Emulsions**. Analysis of Measuring Results and Correlations with Other Tests. Springer Berlin Heidelberg New York, 81-85.
- Bui, T.A., Pham, V.H., Nguyen, H.B, Nguyen, T.P., Nguyen, D.K. and Nguyen, V.C. (2018). Study of Using Cassava Pulp to Produce Livestock Feed Pellet. **International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology**, 8(1), 2088-5334.
- Charmongkolpradit, S. and Luampon, R. (2017). Study of Thin Layer Drying Model for Cassava Pulp. Journal of ScienceDirect. **Energy Procedia**, 138(2017) 354-359.
- Crank J., (1975). **The Mathematics of Diffusion**, second ed. Clarendon Press, Oxford, pp. 47-53.
- Crank, J., Nicolson, P. (1947). A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. **In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, 43(1), 50-67).
- D4648/D4648M – 16, 2018. Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine - Grained Clayey Soil.

- Dzuy, N.Q. and Boger, D.V. (1983). Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. **Journal of Rheology**, 27(4), 321-349.
- Ferraris, C.F. (1999). Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. **Journal of research of the national institute of standards and technology**, 104(5), 461.
- Genovese D.B. and Rao M.A. (2003). Vane Yield Stress of Starch Dispersions. **Journal of Food Science**, 68(7),2295-2301.
- Genovese, D.B. and Rao, M.A. (2005). Components of Vane Yield Stress of Structured Food Dispersions. **Journal of Food Science**, 70(8), 498-504.
- Heldman, D. R. and Lund, D.B. (2007). **Handbook of food engineering second edition**. CRC Press, United States of America, 1023.
- Henríquez, C., Córdova, A., Almonacid, S. and Saavedra, J. (2014). Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. **Journal of Food Engineering**, 143, 146-153.
- Hii, C. L., Law, C. L. and Cloke, M. (2009): Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of food engineering**, 90(2), 191-198.
- Jaito, K., Treeamnuk, T. and Treeamnuk, K. (2017). The performance study of double drum dryer for moisture reduction of cassava pulp. **International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering**, 6(4): 2394-2827
- Kachenpukdee, N., Santerre, C.R., Ferruzzi, M.G. and Oonsivilai, R. (2016). Modified Dietary Fiber from Cassava Pulp and Assessment of Mercury Bioaccessibility and Intestinal Uptake Using an In Vitro Digestion/Caco-2 Model System. **Journal of Food Science**, 81, Nr. 7.
- Karapantsios T. D. (2006). Conductive drying kinetics of pregelatinized starch thin films. **Journal of food engineering**, 76(4), 477-489.
- Karmakar, S. and Kushwaha, R.L. (2006). Soil Viscosity and Yield Stress measurement using a Motorized Rheometer. **presentation at the ASABE Annual International Meeting Sponsored by ASABE. ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Paper Number: 061094.

- Khempaka, S., Molee, W. and Guillaume, M. (2009). Dried cassava pulp as an alternative feedstuff for broilers: Effect on growth performance, carcass traits, digestive organs, and nutrient digestibility. **The Journal of Applied Poultry Research**, 18(3), 487–493.
- Kim, Y.D. and De Kee, D. (2008). Measuring static yield stress of electrorheological fluids using the slotted plate device. **Rheologica acta**, 47(1), 105-110.
- Kosugi, A., Kondo, A., Ueda, M., Murata, Y., Vaithanomsat, P., Thanapase, W., Arai, T. and Mori, Y. (2009). Production of ethanol from cassava pulp via fermentation with a surfaceengineered yeast strain displaying glucoamylase. **Renewable Energy**, 34, 1354–1358.
- Liddel, P. V. and Boger, D. V. (1996). Yield stress measurements with the vane. **Journal of non-newtonian fluid mechanics**, 63(2-3), 235-261.
- Mani, S., Tabil, L. G., and Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and bioenergy**, 30(7), 648-654.
- Mani, S., Tabil, L. G. and Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and bioenergy**, 30(7), 648-654.
- Mellari, S., Boumaza, M. and Egolf, P. W. (2012). Physical modeling, numerical simulations and experimental investigations of Non-Newtonian ice slurry flows. **international journal of refrigeration**, 35(5), 1284-1291.
- Meriam J.L. and Kraige L.G. 2011. **Statics Engineering Mechanics**. John Wiley & Sons, Inc. Seventh Edition, pp.38-40
- Nag, P.K. (2002). **Heat transfer**. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. New Delhi, 729.
- Olusegun, H.D. and Ajiboye, T.K. (2010). The design, construction and testing of a vertical squeeze cassava pulp dewatering machine. **International Journal of Engineering & Applied Sciences**, 2(1), 27-43.
- Qiu, C.G. and Rao, M.A. (1988). Role of pulp content and particle size in yield stress of apple sauce. **Journal of food science**, 53(4), 1165-1170.
- Qiu, J., Boom, R. M. and Schutyser, M. A. (2020). Model development for conductive thin film drying processes. **Journal of Food Engineering**, 268, 109733.
- Ranhotra, G. S., Gelroth, J. A. and Glaser, B. K. (1996). Energy value of resistant starch. **Journal of Food Science**, 61(2), 453-455.

- Rao, M.A. (1999). **Rheology of Fluid Semisolid Foods**. Measurement of Flow and Viscoelastic Properties. Department of Food Science and Technology Cornell University Geneva, New York, 59-82.
- Rizvi, S.S. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. **Engineering properties of foods**, 2, 223-309.
- Sharma, G.P. and Prasad, S. (2006). Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. **Energy**, 31(12): 1921-1926.
- Suksombat, W., Lounglawan, P. and Noosen, P. (2006). Energy and Protein Evaluation of Five Feedstuffs Used in Diet in Which Cassava Pulp as Main Energy Source for Lactating Dairy Cows. **Suranaree J. Sci. Technol**, 14(1),99-107
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter J. and Templeton D. (2008). Determination of ash in biomass. **National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-510-42622**.
- Sun, A. and Gunasekaran, S. (2009). Yield stress in foods: measurements and applications. **International Journal of Food Properties**, 12(1), 70-101.
- Tanpaiboonkul, N. and Budnumpetch, T. (2016). Molding and binding method on properties of fuel from water hyacinth. **Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University**, 3, 2408 – 1248.
- Van Soest, P. V., Robertson, J. B. and Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of dairy science**, 74(10), 3583-3597.
- Wang, N. and Brennan, J.G. (1995). A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. **Journal of Food Engineering**, 24(1), 47-60.
- Xanthopoulos, G., Yanniotis S. and Lambrinos G. R. (2010). Study of the drying behaviour in peeled and unpeeled whole figs. **Journal of Food Engineering**, 97(3), 419-424.
- Yousefi, A., Asadi, V., Nassiri, S.M., Niakousari, M. and Aghdam, S.K. (2012). Comparison of mathematical and neural network models in the estimation of papaya fruit moisture content. **Philippine Agricultural Scientist**, 95(32).



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.1 ความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง

ครั้งที่	น้ำหนัก				ความชื้น กากมันสำปะหลัง (%w.b.)
	ธั่ว	กากมัน สำปะหลัง	ธั่ว+กากมัน สำปะหลัง	กากมัน สำปะหลัง	
	(g)	(g)	(g)	(g)	
1	10.69	6.55	11.6979	1.0079	84.6122
2	11.3	7.78	12.4693	1.1693	84.9704
3	10.75	10.57	12.3619	1.6119	84.7502
เฉลี่ย					84.7776

ตารางผนวกที่ ก.2 ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังที่ระดับความลึก 10 50 และ 100 cm

ความลึก cm	น้ำหนัก			ปริมาตร กระบอก m ³	ความหนาแน่น kg/m ³
	กระบอก	กากมันสำปะหลัง + กระบอก	กากมันสำปะหลัง		
	g	g	kg		
10	279.87	685.25	0.405	0.000386	1049.29
	279.87	685.85	0.406	0.000386	1050.84
	279.87	685.97	0.406	0.000386	1051.15
50	279.87	686.02	0.406	0.000386	1051.28
	279.87	685.12	0.405	0.000386	1048.95
	279.87	684.98	0.405	0.000386	1048.59
100	279.87	686.56	0.407	0.000386	1052.68
	279.87	685.03	0.405	0.000386	1048.72
	279.87	685.58	0.406	0.000386	1050.14

ตารางผนวกที่ ก.3 แรงดัน ไฟฟ้า Torque transducer เทียบกับแรงบิดตามทฤษฎี

แรงดันไฟฟ้า Torque transducer	น้ำหนัก	ความยาวคาน	แรงบิดตามทฤษฎี
mV	kg	m	N m
0.0006	0.010	0.5	0.0491
0.0011	0.020	0.5	0.0981
0.0017	0.030	0.5	0.1472
0.0022	0.040	0.5	0.1962
0.0026	0.050	0.5	0.2453
0.0031	0.060	0.5	0.2943
0.0036	0.070	0.5	0.3434
0.0038	0.080	0.5	0.3924
0.0044	0.090	0.5	0.4415
0.0050	0.100	0.5	0.4905
0.0055	0.110	0.5	0.5396
0.0060	0.120	0.5	0.5886
0.0066	0.130	0.5	0.6377
0.0070	0.140	0.5	0.6867
0.0076	0.150	0.5	0.7358
0.0080	0.160	0.5	0.7848
0.0085	0.170	0.5	0.8339
0.0090	0.180	0.5	0.8829
0.0096	0.190	0.5	0.9320
0.0100	0.200	0.5	0.9810

ตารางผนวกที่ ก.4 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.15 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
130	0.19		1	1.7	57.49	84.77	7.10
			2	1.6	56.54	84.77	8.04
			3	1.7	57.22	84.77	9.10
	0.34		1	1.4	43.33	84.77	8.68
			2	1.4	42.41	84.77	13.03
			3	1.4	42.72	84.77	13.48
	0.51		1	1.1	33.46	84.77	20.45
			2	1.1	33.03	84.77	20.11
			3	1.1	33.43	84.77	20.99

ตารางผนวกที่ ก.5 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.15 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
140	0.19	0.19	1	1.7	46.02	84.77	7.57
			2	1.7	43.24	84.77	8.85
			3	1.7	45.04	84.77	8.61
	0.15	0.34	1	1.3	33.17	84.77	11.30
			2	1.2	31.43	84.77	10.54
			3	1.3	31.54	84.77	11.09
	0.51	0.51	1	1.1	28.07	84.77	8.88
			2	1.2	28.23	84.77	11.47
			3	1.1	28.03	84.77	12.26

ตารางผนวกที่ ก.6 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.15 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
150	0.19	0.19	1	1.8	42.58	84.77	5.83
			2	1.5	38.53	84.77	9.88
			3	1.7	41.09	84.77	7.05
		0.34	1	1.1	26.55	84.77	9.89
			2	1.3	26.07	84.77	9.55
			3	1.2	26.34	84.77	9.66
	0.51	1	1.0	20.08	84.77	13.86	
		2	1.0	21.39	84.77	12.75	
		3	1.0	21.02	84.77	13.29	

ตารางผนวกที่ ก.7 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.30 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น		
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.	
130	0.19	0.19	1	1.4	25.34	84.77	6.27	
			2	1.3	28.22	84.77	5.45	
			3	1.2	28.3	84.77	5.57	
	0.30	0.34	0.34	1	0.9	17.14	84.77	16.18
				2	1.0	20.52	84.77	15.62
				3	1.0	18.35	84.77	18.27
	0.51	0.51	0.51	1	0.7	12.18	84.77	39.97
				2	0.7	13.27	84.77	40.76
				3	0.7	14.05	84.77	39.06

ตารางผนวกที่ ก.8 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.30 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
140	0.19	0.19	1	1.8	37.12	84.77	3.34
			2	1.5	31.54	84.77	1.95
			3	1.5	28.03	84.77	3.17
		0.34	1	0.9	16.49	84.77	9.81
			2	1.0	17.32	84.77	8.67
			3	1.0	16.35	84.77	5.62
	0.51	1	0.7	11.4	84.77	29.84	
		2	0.8	13.28	84.77	24.83	
		3	0.8	12.44	84.77	29.69	

ตารางผนวกที่ ก.9 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.30 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
150	0.19	0.19	1	1.7	24.59	84.77	8.72
			2	1.5	26.35	84.77	8.14
			3	1.9	24.35	84.77	2.78
	0.30	0.34	1	1.1	21.18	84.77	9.50
			2	1.0	14.59	84.77	9.75
			3	0.7	20.18	84.77	8.61
	0.51	0.51	1	1.0	17.2	84.77	30.36
			2	0.9	12.13	84.77	28.32
			3	0.9	14.33	84.77	27.16

ตารางผนวกที่ ก.10 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.50 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น		
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.	
130	0.19	0.19	1	1.1	24.15	85.02	11.88	
			2	1.1	27.32	85.02	11.09	
			3	1.1	26.44	85.02	12.24	
	0.34	0.34	0.34	1	0.8	14.21	85.02	46.40
				2	0.7	15.27	85.02	60.31
				3	0.8	15.03	85.02	51.36
	0.51	0.51	0.51	1	0.6	8.55	85.02	65.23
				2	0.5	9.56	85.02	64.63
				3	0.6	9.59	85.02	64.71

ตารางผนวกที่ ก.11 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.50 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
140	0.19	0.19	1	1.4	25.22	85.02	10.73
			2	1.2	28.51	85.02	9.37
			3	1.4	28.11	85.02	9.77
	0.34	0.34	1	0.9	14.08	85.02	36.48
			2	0.7	17.56	85.02	34.08
			3	0.8	17.44	85.02	33.99
	0.51	0.51	1	0.6	9.33	85.02	51.99
			2	0.6	10.54	85.02	66.04
			3	0.6	9.56	85.02	50.87

ตารางผนวกที่ ก.12 ทดสอบการอบแห้งกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่าง
ลูกกลิ้ง 0.50 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความเร็วรอบ rpm	ครั้งที่	พลังงาน ไฟฟ้า kW-h	เวลา min	ความชื้น	
						เริ่มต้น %w.b.	สุดท้าย %w.b.
150	0.19		1	1.6	26.05	85.02	6.48
			2	1.4	27.14	85.02	8.07
			3	1.6	27.17	85.02	7.56
	0.34		1	1.0	15.06	85.02	27.74
			2	1.2	17.2	85.02	31.85
			3	1.2	18.01	85.02	28.66
	0.51		1	0.7	8.55	85.02	47.40
			2	0.6	9.56	85.02	56.50
			3	0.7	9.59	85.02	49.74

ตารางผนวกที่ ก.13 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ
130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm

อุณหภูมิ °C	ระยะห่าง mm	ความถี่ Hz	เวลา s	ความชื้น %w.b.
130	0.15	เริ่มต้น	0	84.77
		40	44	65.22
		30	59	48.74
		20	88	22.80
		15	118	20.52
		10	177	11.73
		5	311	8.08

ตารางผนวกที่ ก.14 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
140	0.15	เริ่มต้น	0	84.77
		40	44	54.63
		30	59	41.35
		20	88	15.72
		15	118	10.87
		10	177	10.98
		5	311	8.34

ตารางผนวกที่ ก.15 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
150	0.15	เริ่มต้น	0	84.77
		40	44	40.02
		30	59	21.95
		20	88	16.60
		15	118	13.30
		10	177	9.70
		5	311	7.59

ตารางผนวกที่ ก.16 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
130	0.30	เริ่มต้น	0	84.77
		40	44	68.98
		30	59	62.39
		20	88	46.97
		15	118	37.02
		10	177	20.42
		5	311	5.76

ตารางผนวกที่ ก.17 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
140	0.30	เริ่มต้น	0	84.77
		40	44	63.73
		30	59	50.08
		20	88	38.70
		15	118	28.12
		10	177	7.87
		5	311	2.82

ตารางผนวกที่ ก.18 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.30 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
150	0.30	เริ่มต้น	0	84.77
		40	44	61.88
		30	59	39.93
		20	88	32.23
		15	118	27.78
		10	177	5.29
		5	311	3.82

ตารางผนวกที่ ก.19 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 130°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
130	0.50	เริ่มต้น	0	85.02
		40	44	79.77
		30	59	68.89
		20	88	68.02
		15	118	64.86
		10	177	52.69
		5	311	13.42

ตารางผนวกที่ ก.20 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
140	0.50	เริ่มต้น	0	85.02
		40	44	71.49
		30	59	63.36
		20	88	60.54
		15	118	56.71
		10	177	35.71
		5	311	9.96

ตารางผนวกที่ ก.21 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.50 mm

อุณหภูมิ	ระยะห่าง	ความถี่	เวลา	ความชื้น
°C	mm	Hz	s	%w.b.
150	0.50	เริ่มต้น	0	85.02
		40	44	70.85
		30	59	66.00
		20	88	53.91
		15	118	51.21
		10	177	29.42
		5	311	7.37

ตารางผนวกที่ ก.22 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพของกากมันสำปะหลัง

สถานะการทำแห้ง	Ash	Protein	Fat	fiber	Starch
	2.826	2.086	0.313	33.317	61.457
Freez dry	1.698	1.912	0.193	34.979	61.218
	2.221	2.019	0.195	34.150	61.415
	2.909	2.010	0.305	37.352	57.424
D 130	3.510	2.044	0.029	36.410	58.006
	3.539	1.964	0.336	36.880	57.281
	2.898	2.132	0.175	37.780	57.014
D 140	2.924	2.099	0.236	37.258	57.483
	3.999	2.110	0.276	37.520	56.094
	3.106	2.278	0.228	37.910	56.478
D 150	3.585	2.256	0.106	37.968	56.085
	2.749	2.267	0.257	37.940	56.787

ตารางผนวกที่ ก.23 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
1	มอเตอร์ไฟฟ้า	1	12,000	12,000
2	ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	4	2,000	8,000
3	เกียร์ทด	1	10,000	10,000
4	สายไฟ VCT	5	1,000	5,000
5	ตู้ไฟเหล็ก	1	1,000	1,000
6	กลิ้งชิ้นงาน ขึ้นรูปชิ้นงานตามแบบประกอบไปด้วย		120,000	120,000
	- ลูกกลิ้งอบแห้ง ทำจากสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.7 cm ยาว 60 cm	2		
	- ฟันเฟืองขับลูกกลิ้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.2 cm	2		
	- ฝาครอบลูกป้อนลูกกลิ้งอบแห้ง ขนาด 20 cm * 20 cm	4		
	- แผ่นฝาข้างเครื่องอบแห้งขนาด 80 cm * 80 cm	2		
	- แท่นวางฮีตเตอร์	4		
	- ชุดใบมีดขนาด 5 cm ยาว 80 cm	6		
	จำนวน 2 ชุด 1 ชุดมี 3 ชิ้น (2 * 3)			
	- อุปกรณ์จับยึดต่าง ๆ			
7	ประกอบตู้ควบคุม เดินระบบไฟฟ้า	1	15,000	15,000
8	วัสดุสิ้นเปลือง (เหมาจ่าย)		5,000	5,000
	รวมเป็นเงิน			176,000



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 สมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลัง

ข.1.1 ความชื้นของกากมันสำปะหลัง

ความชื้นของกากมันสำปะหลังเริ่มต้น ตัวอย่างที่ 3 (ตารางภาคผนวกที่ ก.1)

$$M = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100\%$$

$$M = \frac{10.57 - 1.6119}{10.57} \times 100\%$$

$$M = 84.7502\%$$

โดยที่ M คือความชื้นของกากมันสำปะหลัง (w.b.)

w_i คือน้ำหนักกากมันสำปะหลังก่อนเข้าสู่อบลมร้อน (g)

w_f คือน้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังเข้าสู่อบลมร้อน (g)

กากมันสำปะหลังมีความชื้น 84.7502% (w.b.)

ข.1.2 ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง

ความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังตัวอย่างที่ 1 ที่ระดับความลึก 10 cm (ตารางภาคผนวกที่ ก.2)

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{0.405}{0.000386}$$

$$\rho = 1,049.22$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของกากมันสำปะหลัง (kg/m^3)

m คือน้ำหนักของกากมันสำปะหลัง (kg)

v คือปริมาตรของกระบอกบรรจุกากมันสำปะหลัง (m^3)

กากมันสำปะหลังมีความหนาแน่น $1,049.22 \text{ kg/m}^3$

ข.1.3 แรงบิดของ Torque transducer

แรงบิดของ Torque transducer ที่น้ำหนัก 0.05 kg ความยาวคาน 0.5 m (ตารางภาคผนวกที่ ก.3)

ชุดน้ำหนักถ่วงไว้กับคานเพื่อสร้างค่าแรงบิดที่ทราบค่าแน่นอนเป็น kg เปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยของ N โดยการ $0.05 \times 9.81 = 0.4905 \text{ N}$ แทนค่าในสมการหาค่าแรงบิด

$$T = F \times L$$

$$T = 0.4905 \times 0.5$$

$$T = 0.24525$$

โดยที่ T คือแรงบิด (N m)

F คือแรงที่กระทำบนคาน (N)

L คือระยะตั้งฉากของแรงกระทำ (m)

แรงบิดที่ทราบค่าของน้ำหนัก 0.05 kg มีค่าเท่ากับ 0.24525 N m

ข.1.4 แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลัง

แรงเฉือนสูงสุดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 79.49% (w.b.) ที่ความเร็วรอบการหมุน 64 rpm มีค่าแรงบิดสูงสุดเท่ากับ 0.239 N m (ตารางที่ 4.2)

$$\tau_m = \frac{T_m}{K}$$

$$\tau_m = \frac{0.239}{K}$$

โดยที่ τ_m คือความเค้นเฉือนสูงสุด (N/m²)

T_m คือแรงบิดสูงสุด (N m)

K คือค่าคงที่ใบ Vane (m³)

ค่า K เป็นค่าคงที่ของใบ Vane หาได้จากสมการ

$$K = \frac{\pi D^2 H}{2 \times 10^9} \left[1 + \frac{D}{3H} \right]$$

ใบ Vane ที่ทำการทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ความสูงของใบ 50.8 mm แทนค่าในสมการ

$$K = \frac{3.14 \times (25.4^2) \times 50.8}{2 \times 10^9} \left[1 + \frac{25.4}{3(50.8)} \right]$$

$$K = 6 \times 10^{-5}$$

ใบ Vane ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm สูง 50.8 mm มีค่าคงที่ $K = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
นำค่า K ไปแทนในสมการเพิ่มหาค่าแรงเฉือนสูงสุด

$$\tau_m = \frac{0.239}{6 \times 10^{-5}}$$

$$\tau_m = \frac{0.2399}{6 \times 10^{-5}}$$

$$\tau_m = 3996.33$$

ค่าแรงเฉือนของกากมันสำปะหลัง 79.49% (w.b.) ที่ความเร็วรอบการหมุน 64 rpm แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 0.239 N m มีค่าแรงเฉือน 3996.33 Pa

ข.1.5 การหาค่าความหนืดของกากมันสำปะหลัง

ความหนืดของกากมันสำปะหลังหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{\tau_m}{\dot{\gamma}}$$

โดยที่ η คือค่าความหนืด (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ คือค่าอัตราเฉือน (1/s) ซึ่งอัตราเฉือนมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{\gamma} = k_s \frac{N}{60}$$

โดยที่ N คือความเร็วรอบการหมุน (rpm)

k_s คือค่าคงที่ของใบ Vane ที่มีอัตราส่วน 2 : 1 มีค่าเท่ากับ (11.6/rev)

ใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ 64 rpm

$$\dot{\gamma} = 11.6 \times \frac{64}{60}$$

$$\dot{\gamma} = 12.37$$

ที่ความเร็วรอบการหมุน 64 rpm มีค่าอัตราเฉือนเท่ากับ 12.37 s^{-1} นำไปแทนค่าเพื่อหาความหนืดของกากมันสำปะหลัง

$$\eta = \frac{\tau_m}{\dot{\gamma}}$$

$$\eta = \frac{3,996.33}{12.37}$$

$$\eta = 323.07$$

ความหนืดของกากมันสำปะหลังที่ความชื้นของกากมันสำปะหลัง 79.49% (w.b.) ที่ความเร็วรอบการหมุน 64 แปลงเป็นอัตราเฉือนมีค่าเท่ากับ 12.37 s^{-1} มีค่าความหนืดของกากมันสำปะหลัง 323.37 Pa s

ข.2 ประเมินสรรณะการอบแห้ง

ข.2.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ อบแห้งกากมันสำปะหลัง 1 kg สภาวะการอบแห้ง อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm และความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 0.19 rpm ความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง 84.77% (w.b.) ความชื้นของกากมันสำปะหลังผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ 7.10% (w.b.) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง 1.7 kW-h หาได้จากสมการ (ตารางผนวกที่ ก.4)

$$\text{SEC} = \frac{3.6 \times E}{m_{\text{water}}}$$

โดยที่ SEC คือค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)

E คือพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kW-h)

m_{wat} คือมวลของน้ำที่ระเหยออกจากกากมันสำปะหลัง (kg)

$$\text{SEC} = \frac{3.6 \times 1.7}{m_{\text{water}}}$$

m_{water} หาได้จากสมการ

$$m_{\text{water}} = m_i - \frac{m_d}{(1 - w_f)}$$

โดยที่ m_i คือน้ำหนักของกากมันสำปะหลังเริ่มต้น (kg)

m_d คือน้ำหนักแห้งของกากมันสำปะหลัง (kg)

w_f คือความชื้นของกากมันสำปะหลังหลังผ่านการอบการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (% w.b.)

$$m_{\text{water}} = 1 - \frac{m_d}{(1 - 0.071)}$$

m_d ของกากมันสำปะหลังหาได้จาก

$$m_d = m_i \times \left(1 - \frac{w_i}{100} \right)$$

$$m_d = 1 \times \left(1 - \frac{84.77}{100} \right)$$

$$m_d = 0.1523$$

กากมันสำปะหลังมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.1523 kg

$$m_{\text{water}} = 1 - \frac{0.1523}{(1 - 0.071)}$$

$$m_{\text{water}} = 0.8361$$

มีปริมาณน้ำระเหย 0.8361 kg แทนค่าในสมการหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน
จำเพาะ

$$\text{SEC} = \frac{3.6 \times 1.7}{0.8361}$$

$$\text{SEC} = 7.32$$

อบแห้งกากมันสำปะหลัง 1 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 84.77% (w.b.) เหลือความชื้น
หลังการอบแห้ง 7.10% (w.b.) ปริมาณน้ำระเหย 0.8361 kg มีค่าพลังงานจำเพาะ 7.32 MJ/kg_{water}

ข.2.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เป็นความสามารถในการระเหยน้ำออกจาก
วัสดุโดยดูจากอัตราการระเหยน้ำออกจากกากมันสำปะหลังต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ใช้
สภาวะการอบแห้งตามข้อ ข.3.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 57.49 min (ตารางผนวกที่ ก.4)

$$\text{DR} = \frac{m_{\text{water}}}{t}$$

โดยที่ DR คืออัตราการอบแห้ง (kg/h)

t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

$$\text{DR} = \frac{0.8361}{(57.49 / 60)}$$

$$DR = 0.8726$$

อัตราการทำแห้งกากมันสำปะหลัง 0.8726 kg/h

ข.2.2 ความสามารถในการทำแห้งกากมันสำปะหลัง

ความสามารถในการอบแห้ง (Drying capacity, DC) บ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตกากมันสำปะหลังต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ใช้สภาวะการอบแห้งตามข้อ ข.3.1 ข.3.2

$$DC = \frac{W_p}{t}$$

โดยที่ DC คือความสามารถในการทำแห้ง (g/min)

W_p คือน้ำหนักกากมันสำปะหลังสด (g)

t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้งกากมันสำปะหลัง (min)

$$DC = \frac{1000}{57.49}$$

$$DC = 17.39$$

ความสามารถในการอบแห้งของกากมันสำปะหลังที่สภาวะการทำแห้ง อุณหภูมิการอบแห้ง 130°C ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 mm และความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 0.19 rpm มีความสามารถในการทำแห้ง 17.39 kg/h

ข.3 พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับเครื่องอบแห้ง

คิดที่สภาวะการอบแห้ง 140°C ที่ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.3 mm ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 0.34 rpm ความชื้นเริ่มต้นของกากมันสำปะหลัง 84.77% (w.b.) หรือ 556.60% (d.b.) ความชื้นของกากมันสำปะหลังหลังการอบแห้ง 14% (w.b.) หรือ 16.27% (d.b.) มวลแห้งของกากมันสำปะหลัง 0.15 kg ค่าความร้อนแฝงของน้ำ 334 kJ/kg ความจุความร้อนของกากมันสำปะหลัง 3.66 kJ/kg °C มวลของลูกกลิ้งอบแห้ง 16.84 kg ความจุความร้อนของสแตนเลส 0.46 kJ/kg °C และอากาศรอบ ๆ เครื่องอบแห้ง 35°C

3.1 ปริมาณความร้อนที่ถูกกึ่งได้รับ

$$Q_a = mC_p (\Delta T)$$

$$Q_a = mC_p (T_2 - T_1)$$

$$Q_a = 16.84 \times 0.46 \times (140 - 35) \text{ kg} \times \text{kJ/kg}^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C}$$

$$Q_a = 813.37 \text{ kJ}$$

3.2 ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ

$$Q_{\text{evap}} = W_d (M_i - M_f) h_{\text{fg}}$$

$$Q_{\text{evap}} = 0.15(5.556 - 0.1627) 334 \text{ kg} \times \text{kJ/kg}$$

$$Q_{\text{evap}} = 270.70 \text{ kJ}$$

3.3 ปริมาณความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ

$$Q_s = W_d C_{pd} (T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i$$

$$Q_s = 0.15 \times (3.66) \times (353 - 308) + 0.15 \times (4.18) \times (353 - 308) \times 5.566$$

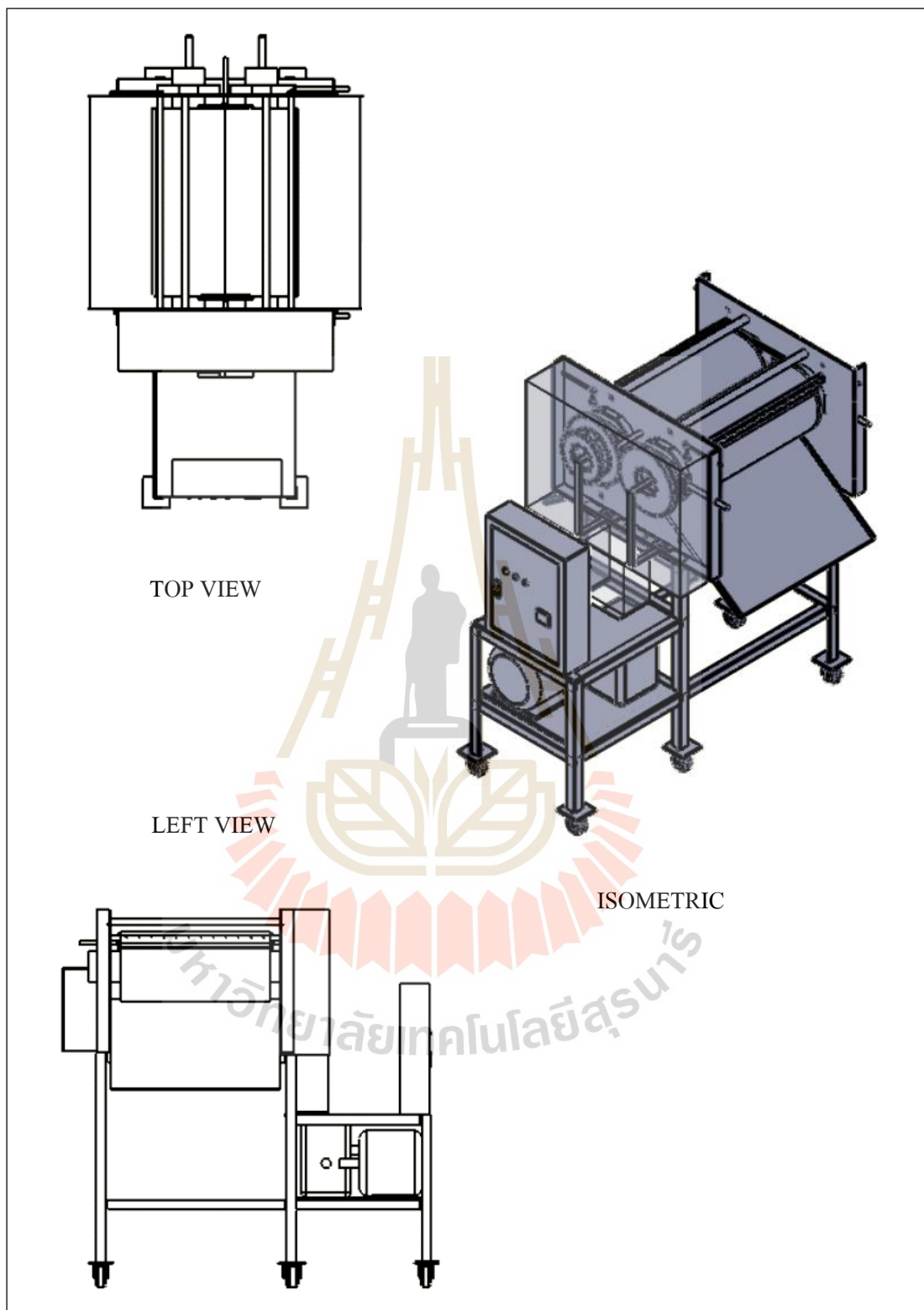
$$\text{kg} \times \text{kJ/kg K} \times \text{K}$$

$$Q_s = 181.75 \text{ kJ}$$

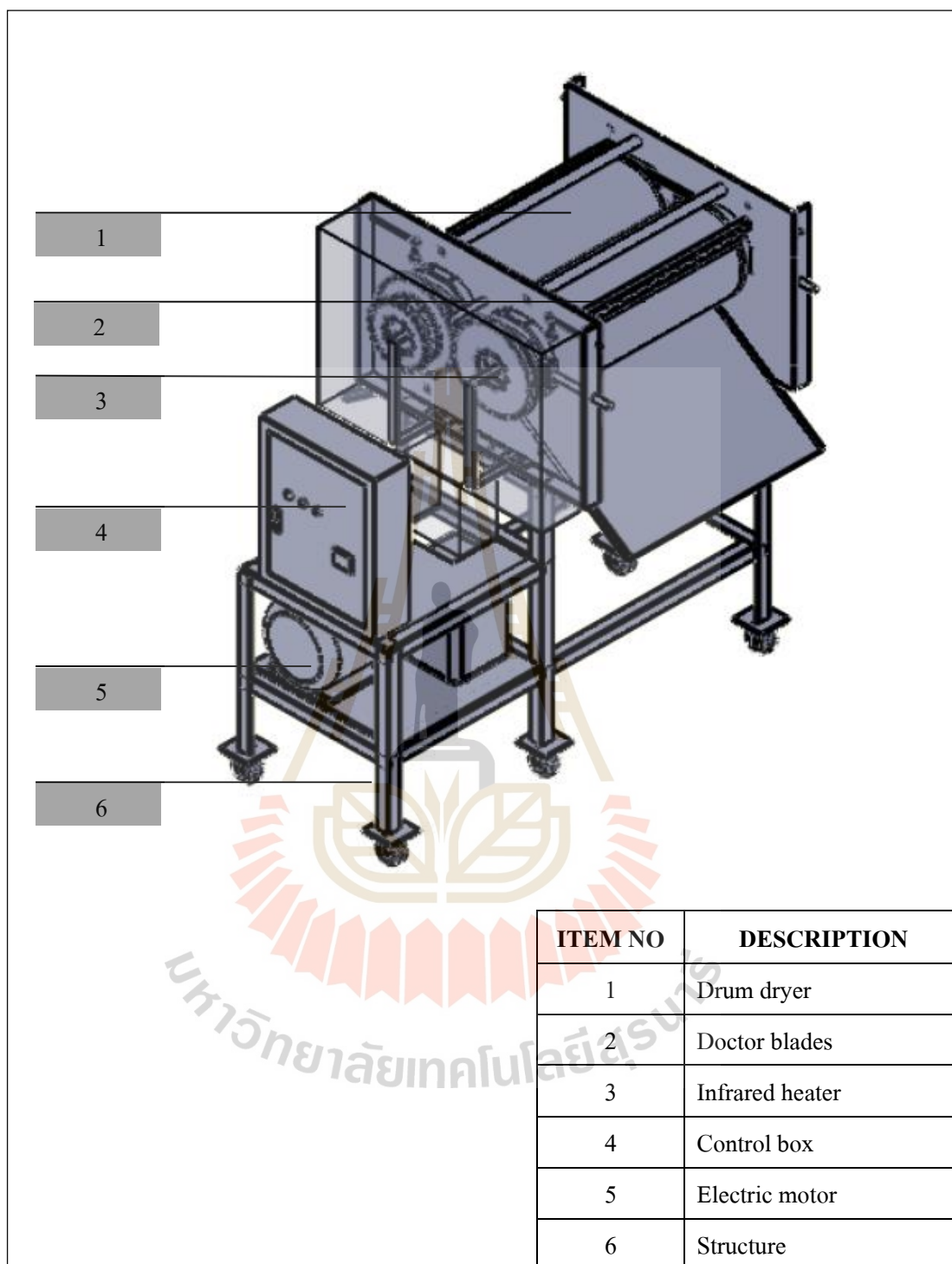


ภาคผนวก ค

แบบเครื่องอบแห้ง



รูปที่ ค.1 แบบเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



รูปที่ ค.2 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



ภาคผนวก ง

รูปประกอบการทดลอง



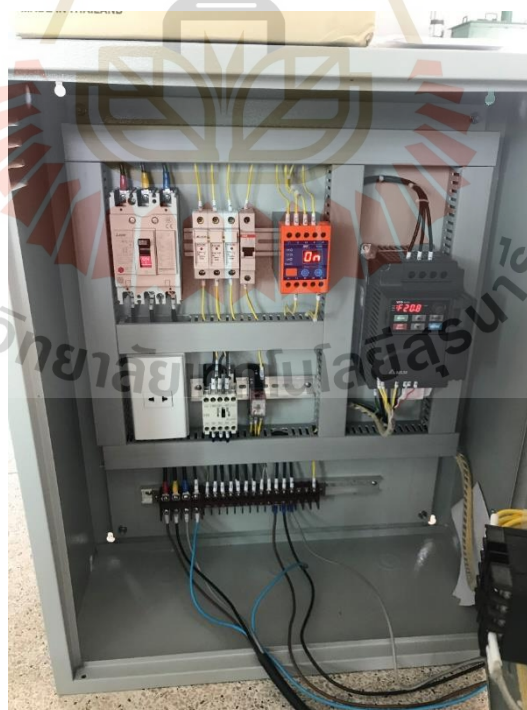
รูปที่ ง.1 กากมันสำปะหลังหลังจากกระบวนการผลิตแป้ง



รูปที่ ง.2 อบแห้งกากมันสำปะหลังเพื่อหาความชื้นของกากมันสำปะหลัง



รูปที่ ง.3 สร้างเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



รูปที่ ง.4 ต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุม



รูปที่ ง.5 ปรับตั้งค่าระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง



รูปที่ ง.6 ปรับตั้งค่าอุณหภูมิอบแห้ง



รูปที่ ง.7 ปรับตั้งค่าความเร็วรอบของลูกกลิ้ง



รูปที่ ง.8 ป้อนกากมันสำปะหลังเข้าเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



รูปที่ ง.9 อบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



รูปที่ ง.10 กากมันสำปะหลังที่ได้ผ่านการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



รูปที่ ง.11 หาคความชื้นกากมันสำปะหลังที่ได้ผ่านการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



รูปที่ ง.12 หาปริมาณเถ้าของกากมันสำปะหลัง



ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จ.1 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ที่แสดงในตารางภาคผนวก ก.23 สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขต่าง ๆ ของการคำนวณดังนี้

- 1) ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งรวม 176,000 บาท
- 2) อบแห้งกากมันสำปะหลังสดได้ชั่วโมงละ 3.6 กิโลกรัม
- 3) ราคากากมันสำปะหลัง 0.10 บาทต่อกิโลกรัม
- 4) ราคากากมันสำปะหลังแห้ง 6 บาทต่อกิโลกรัม
- 5) ทำงานสัปดาห์ละ 6 วัน ดังนั้นทำงานปีละ 312 วัน
- 6) อัตราใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงเท่ากับ 3 kWh
- 7) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 6.5% (ชกส. 1 มิ.ย.63)
- 7) ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 10 ปี
- 8) มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของต้นทุน 17,600 บาท
- 9) ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5% ของต้นทุน 8,800 บาท
- 10) ค่าไฟฟ้าราคา 3.2 บาท/kWh
- 11) ค่าแรงงาน 1 คน วันละ 300 บาท

ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง

$$\begin{aligned}
 \text{เงินลงทุนรายปี} &= 176,000 \text{ CRF } (6.50\%, 10) \\
 &= 176,000(i(1+i)^n)/((1+i)^n-1) \\
 &= 176,000(0.065(1+0.065^{10})/((1+0.065)^{10}-1)) \\
 &= 24,486.26 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{มูลค่าซากรายปี} &= 176,000 \text{ SFF } (6.50\%, 10) \\
 &= 176,000(i / ((1+i)^n-1)) \\
 &= 176,000(0.065 / ((1+0.065)^{10}-1)) \\
 &= 13,044.47 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าบำรุงรักษา} &= 176,000 \times 0.05 \\ &= 8,800 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าพลังงานไฟฟ้ารายปี} &= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้ไฟฟ้า} \times \text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย} \\ &= 312 \times (3 \times 8) \times 3.2 \\ &= 23,961.6 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่ากากมันสำปะหลัง} &= (3.6 \text{ กิโลกรัม/ชั่วโมง} \times 8 \text{ ชั่วโมง}) \times \text{ราคากากมันสำปะหลัง} \times \\ \text{วันทำงาน} & \\ &= (3.6 \times 8) \times 0.1 \times 312 \\ &= 898.56 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{เงินค่าแรงงาน} &= 300 \times 312 \\ &= 93,600 \text{ บาท/ปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{รวมเงินลงทุนรายปี} &= (\text{เงินลงทุนสร้างเครื่องรายปี} + \text{เงินค่าบำรุงรักษารายปี} + \text{ค่าผลิตภัณฑ์} \\ \text{กากมันสำปะหลัง} + \text{ค่าพลังงานในการอบแห้ง} + \text{ค่าแรงงาน}) - (\text{มูลค่าซากรายปี})\end{aligned}$$

$$\text{รวมเงินลงทุนรายปี} = (24,486.26 + 8,800 + 898.56 + 23,961.6 + 93,600) - 13,044.47$$

$$\text{รวมเงินลงทุนรายปี} = 138,701.95 \text{ บาท}$$

น้ำหนักกากมันสำปะหลังหลังการอบแห้ง

$$\text{ความชื้นเริ่มต้น} \quad 84.55\% \text{ (w.b)}$$

$$\text{ปริมาณเริ่มต้น} \quad (3.6 \times 8) \times 312 = 8,985.6 \text{ kg}$$

$$\text{ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ} \quad 14\% \text{ (w.b.)}$$

$$\begin{aligned}\text{น้ำหนักแห้งของกากมันสำปะหลัง} &= \text{น้ำหนักเริ่มต้น} \times (1 - (\text{ความชื้นของวัสดุ}/100)) \\ &= 8985.6 \times (1 - (84.77 / 100)) \\ &= 1,368.51 \text{ kg}\end{aligned}$$

น้ำหนักกากมันสำปะหลังที่ความชื้น 14% = (น้ำหนักแห้งกากมันสำปะหลัง/1 – (ความชื้นกากมันสำปะหลัง/100))

$$= 1,368.51 / 1 - (14 / 100)$$

$$= 1,591.29 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{ราคากากมันสำปะหลังแห้ง} &= 1,591.29 \times 6 \\ &= 9,547.74 \text{ บาท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \text{รวมเงินลงทุนรายปี} / \text{ราคากากมันสำปะหลังแห้ง} \\ &= 138,701.95 / 9,547.74 \\ &= 14 \text{ ปี} \end{aligned}$$

การอบแห้งกากมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ยังไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีความชื้นสูงต้องใช้พลังงานสูงในการระเหยน้ำออก และกากมันสำปะหลังยังมีมูลค่าค่อนข้างต่ำ จากราคาคืนทุนที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าต้นทุนส่วนใหญ่เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง หากสามารถใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม สามารถลดต้นทุนในการอบแห้งกากมันสำปะหลังได้



ภาคผนวก ฉ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Kaattisak Jaito, Tawarat Treamnuk, Krawee Treamnuk. (2017). **The performance study of double drum dryer for moisture reduction of cassava pulp.** International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, 4(6), 2394-2827.

Kiattisak Jaito, Tawarat Treamnuk, Krawee Treamnuk. (2019). **Development of Motorized Rheometer for measure Cassava-pulp Viscosity and Yield Stress.** The 16th International Conference on Automation Technology (Automation 2019), at Taipei, Taiwan.

เกียรติศักดิ์ ใจโต, เทวรัตน์ ตริอำนาจ, กระวี ตริอำนาจ. (2564). การอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งคู่. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 13(3).



ประวัติผู้เขียน

นายเกียรติศักดิ์ ใจโต เกิดเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2531 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนส่องแสงพณิชยการ จังหวัดสงขลา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2554

ปี พ.ศ.2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร หลักสูตรวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้สำเร็จการศึกษาเมื่อปี 2558

ปี พ.ศ.2559 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนศึกษาพระดุษฎีบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ได้รับการสนับสนุนการวิจัยแผนงานพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณปี 2563 และได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการในรายวิชา ระดับปริญญาตรี ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร 1 ปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและอาหาร 1 การเขียนแบบวิศวกรรม 2 ปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร 2 ปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและอาหาร 2 ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบสำหรับวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี