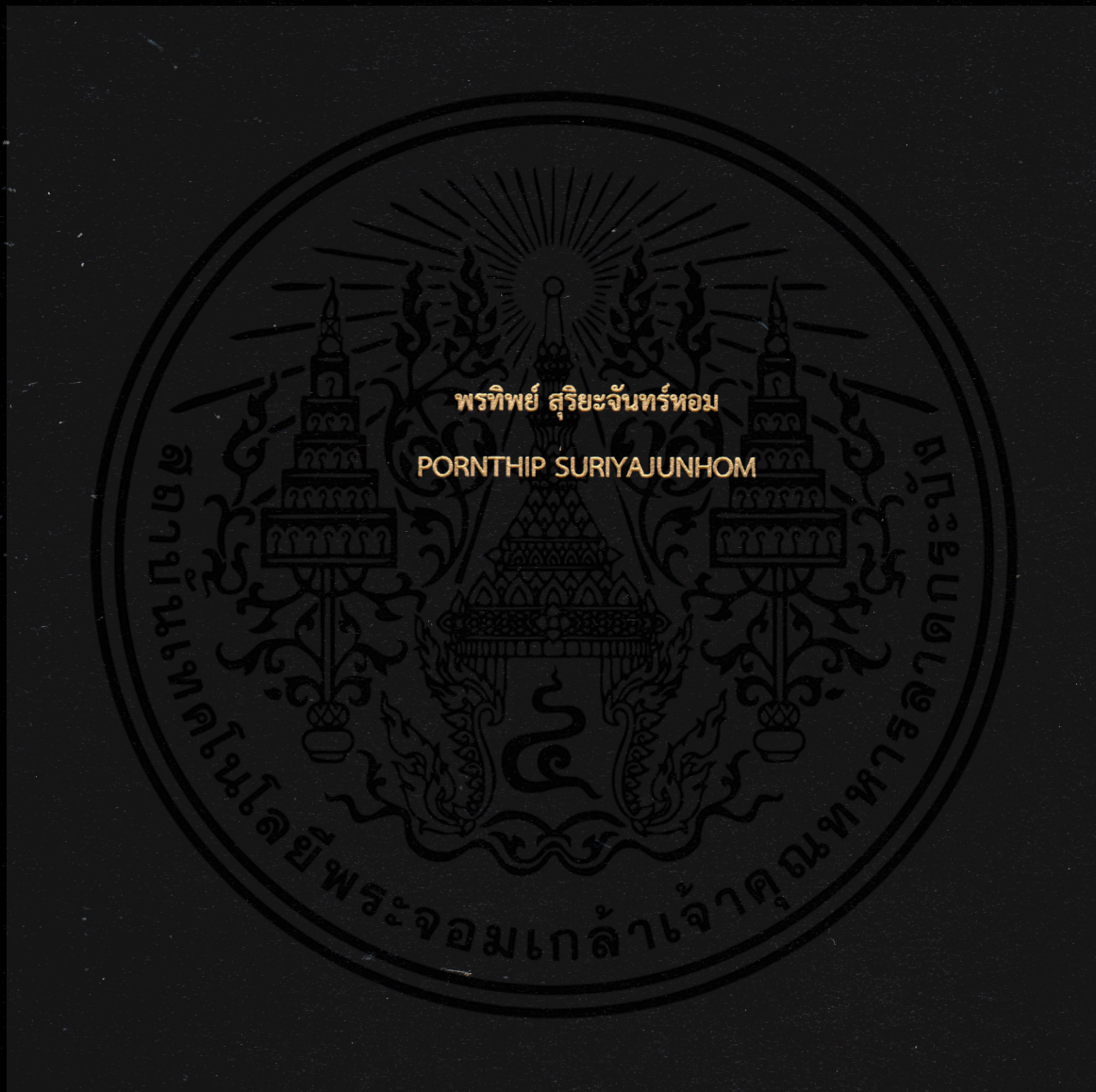


การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งฟักข้าวด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

DRUM DRYING PROCESS OPTIMIZATION FOR GAC FRUIT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-270-143

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งฟักข้าวด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

DRUM DRYING PROCESS OPTIMIZATION FOR GAC FRUIT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ขึ้นสู่สื่อหรือช่องทางอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-270-143

DRUM DRYING PROCESS OPTIMIZATION FOR GAC FRUIT



PORNTHIP SURUYAJUNHOM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2018

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2018-EN-M-270-143



COPYRIGHT 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันฯ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งฟักข้าวด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง
นักศึกษา	นางสาวพรทิพย์ สุริยะจันทร์หอม
รหัสประจำตัว	57601288
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงและหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟักข้าวผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน ตัวแปรที่ศึกษา ประกอบด้วย อุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้ง (115 125 และ 135°C) ปริมาณของมอลโตเด็คซ์ตริน DE10 (100 150 และ 200% น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด) และปริมาณของกัมอะราบิก (10 20 และ 30% น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด) ผลตอบสนองที่พิจารณาเป็นสมบัติทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี สี ความสามารถในการละลาย การดูดกลับความชื้น สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณไลโคปีน การหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรอาศัยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง สมการพื้นผิวตอบสนองทำนายได้ด้วยสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง จากการศึกษาพบว่าปริมาณมอลโตเด็คซ์ตริน อุณหภูมิการทำแห้ง และปริมาณกัมอะราบิกมีผลต่อความชื้น ความสามารถในการละลาย และการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินมีแนวโน้มทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ การเปลี่ยนแปลงสี และความสามารถในการละลายมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี การดูดกลับความชื้น สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีแนวโน้มลดลง ส่วนผลของอุณหภูมิการทำแห้งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวลูกกลิ้งมีแนวโน้มให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ผง ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ความสามารถในการละลาย การดูดกลับความชื้น สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณไลโคปีนของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ความชื้นมีแนวโน้มลดลง และสำหรับปริมาณกัมอะราบิกพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกมีแนวโน้มให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ การเปลี่ยนแปลงสี การดูดกลับความชื้นมีค่าสูงขึ้น ส่วนความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณไลโคปีนของผลิตภัณฑ์ผลมีแนวโน้มลดลง จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยอาศัยเกณฑ์คุณสมบัติผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงที่พึงประสงค์ ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมใน

การผลิตฟักข้าวผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง คือ อุณหภูมิการทำแห้งในช่วง 126-129°C
ความเข้มข้นมอลโตเด็คซ์ตริน 105-116% และความเข้มข้นกัมอะราบิก 10%

คำสำคัญ : ฟักข้าว, การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง, มอลโตเด็คซ์ตริน, กัมอะราบิก, วิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Drum drying process optimization for gac fruit
Student	Miss. Pornthip Suriyajunhom
Student ID	57601288
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong

ABSTRACT

The purposes of this study were to investigate the effects of processing conditions on physical and chemical characteristics of gac powder obtained with drum drying process and to determine the optimum drum drying condition for gac powder. The experiment was performed based on Box-Behnken design. The process variables were drum surface temperatures (115, 125 and 135 °C), maltodextrin (DE10) content (100, 150 and 200%, W/W_{gac solid}) and gum arabic content (10, 20 and 30%, W/W_{gac solid}). The response variables were product yield, moisture content, water activity, color change, solubility, hygroscopicity, total phenolic compound and lycopene content. The optimum condition was determined using response surface methodology (RSM). The experimental data were expressed as the second order polynomial equations. The results showed that maltodextrin content, drum surface temperature and gum arabic content had significant effects on moisture content, solubility and hygroscopicity of gac powder ($p < 0.05$). The increase in maltodextrin content tended to increase product yield, colour change and solubility of the product, while moisture, water activity, hygroscopicity, total phenolic compound and lycopene content were decreased. Increasing drum surface temperature resulted in an increase of product yield, colour change, solubility, hygroscopicity, phenolic compound and lycopene content, whereas a decrease in moisture content was observed. It was also found that an increase in gum arabic content tended to increase the product yield, the change of colour and hygroscopicity while a decrease in moisture content, water activity, phenolic compound and lycopene content were observed. Based on the desired characteristics of gac powder, it was found that the optimum processing conditions were drum surface

temperature in a range of 126-129^oC, maltodextrin content in a range of 105-116% (W/W_{gac solid}) and gum arabic content of 10% (W/W_{gac solid}).

Keyword: Gac fruit, Drum drying, Maltodextrin, Gum arabic, Response surface methodology



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยการให้คำปรึกษาและการสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ซึ่งท่านเป็นผู้ให้คำแนะนำ รับฟังปัญหา และคอยสนับสนุนช่วยเหลือ ในหลาย ๆ เรื่อง ทั้งเรื่องการศึกษาและการให้ทัศนคติที่ดีในเรื่องต่าง ๆ ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมกรสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ลัดดา แสงเดือน วัฒนศิริธรรม ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม ดร.มธุรดา จิโนรส และ ผศ. ดร.ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ ผู้ให้คำแนะนำและให้ความรู้ทั้งทางทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแนะแนวปัญหาต่าง ๆ นอกจากนี้ ขอขอบคุณการให้ความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่วิจัยและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ช่วยสนับสนุนดูแลเรื่องการใช้อุปกรณ์และสถานที่ให้มีความสะดวกในการศึกษา ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ อีกทั้งกำลังใจ ให้สามารถก้าวเดินมาได้จนถึงปัจจุบันนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่คอยรับฟังปัญหาและให้กำลังใจ สุดท้ายขอขอบคุณบิดามารดาและครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทุก ๆ อย่างมาโดยตลอดจนปัจจุบัน

พรทิพย์ สุริยะจันทร์หอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ฟักข้าว.....	4
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของฟักข้าว.....	4
2.1.2 คุณค่าทางโภชนาการของฟักข้าว.....	7
2.1.3 การแปรรูปฟักข้าวในปัจจุบัน.....	15
2.2 การทำแห้ง.....	15
2.2.1 หลักการทำแห้ง.....	16
2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแห้งอาหาร.....	21
2.2.3 การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	24
2.2.4 บรรจุภัณฑ์บรรจุผลไม้แห้ง.....	29
2.2.5 สมบัติของอาหารแห้ง.....	30
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำแห้ง.....	31
2.4 วิธีการฟื้นผิวตอบสนอง.....	34
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วัสดุติบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	41
3.1 วัสดุอุปกรณ์	41
3.1.1 วัสดุติบและสารเคมี	41
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	41
3.2 วิธีการดำเนินการ	42
3.2.1 การเตรียมวัสดุติบ	42
3.2.2 การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	42
3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวสด.....	45
3.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวผง	45
3.2.5 แผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ	47
ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	49
4.1 สมบัติของฟักข้าวสดก่อนการทำแห้ง.....	49
4.2 สมบัติของฟักข้าวผงจากการทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่สภาวะต่าง ๆ	50
4.3 สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์	54
4.4 ผลของอุณหภูมิการทำแห้ง มอลโตเด็คซ์ตรินและกัมอะราบิกต่อสมบัติทางเคมีและ กายภาพของฟักข้าวผง.....	56
4.4.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้	56
4.4.2 ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์.....	58
4.4.3 วอเตอร์แอกทิวิตี้.....	60
4.4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี.....	62
4.4.5 ค่าความสามารถในการละลาย	66
4.4.6 ค่าการดูดกลับความชื้น.....	68
4.4.7 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	70
4.4.8 ปริมาณไลโคปีน	72
4.5 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต	74
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก	85
ภาคผนวก ข	87
ประวัติผู้เขียน	96



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชื่อของฟักข้าวตามภูมิภาค.....	5
2.2 องค์ประกอบของฟักข้าว.....	6
2.3 ลักษณะทางกายภาพของผลฟักข้าวตามระดับความสุก.....	7
2.4 องค์ประกอบทางโภชนาการของฟักข้าว ต่อ 100 g.....	7
2.5 ปริมาณไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนในฟักข้าว.....	9
2.6 องค์ประกอบของกรดไขมันในเยื่อหุ้มฟักข้าว.....	11
2.7 ประเภทของสารประกอบฟีนอลิกจำแนกโดยใช้สายคาร์บอนเป็นเกณฑ์.....	12
2.8 โครงสร้างของเคมีของฟลาโวนอยด์ชนิดต่าง ๆ	14
3.1 การเติมปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินและกัมอะราบิก ต่อตัวอย่างฟักข้าว 1200 g.....	44
3.2 แผนการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน ทั้งหมด 15 การทดลอง.....	48
4.1 แสดงสมบัติของวัตถุดิบฟักข้าว.....	49
4.2 ค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ ความชื้นผลิตภัณฑ์และค่าออเตอร์แอกทิวิตี้ที่ได้จากการทดลอง.....	51
4.3 ค่าสีของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงที่ได้จากการทดลอง.....	52
4.4 ค่าความสามารถในการละลาย การดูดกลับความชื้น ปริมาณฟีนอลิกและปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์.....	53
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์.....	54
4.6 สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่านัยสำคัญ (p-value).....	55
4.7 เกณฑ์กำหนดสมบัติทางเคมีกายและภาพของฟักข้าวผง.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

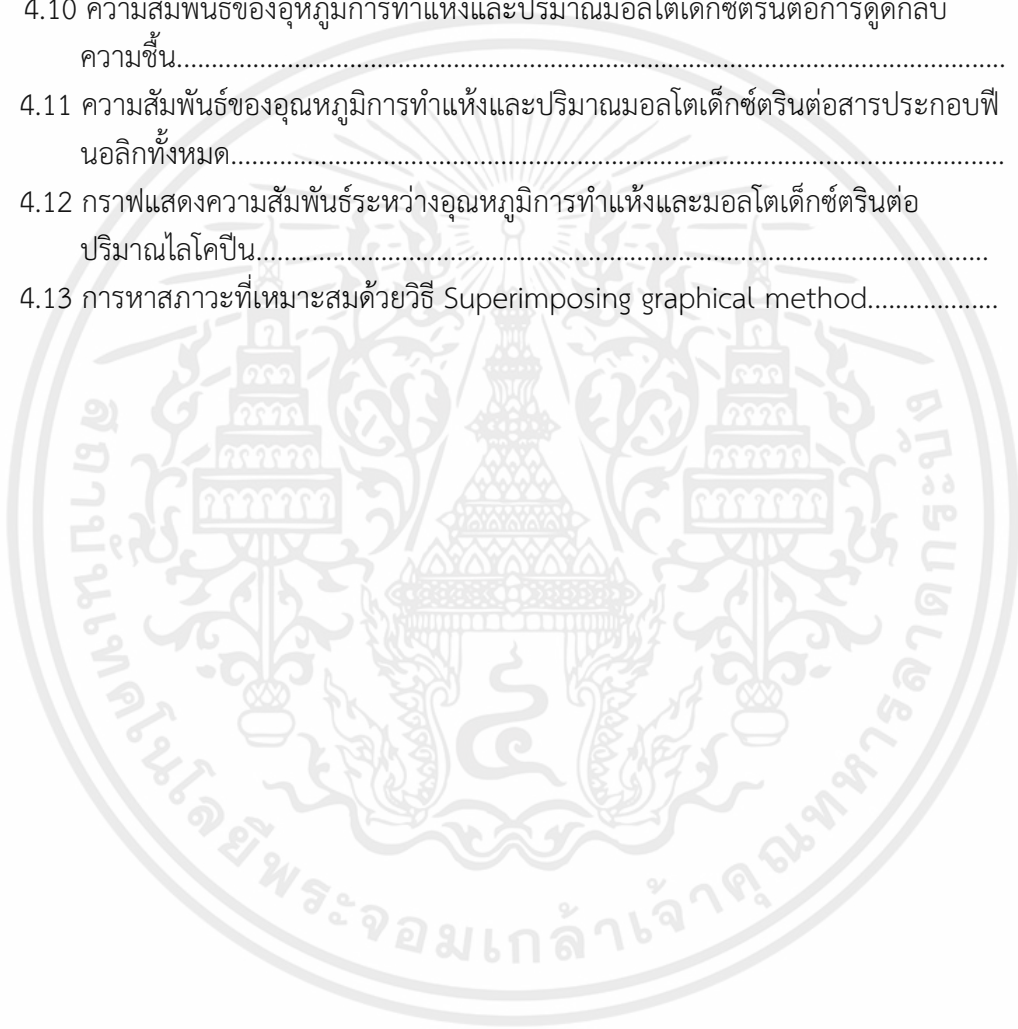
รูปที่	หน้า
2.1 ดอกฟักข้าว.....	5
2.2 ลักษณะของฟักข้าว.....	6
2.3 ฟักข้าวที่ความสุกระดับต่างๆ.....	7
2.4 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณเบต้าแคโรทีนของผลไม้ชนิดต่างๆ.....	8
2.5 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณไลโคปีนของผลไม้ชนิดต่างๆ.....	8
2.6 โครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีน.....	9
2.7 โครงสร้างของไลโคปีนในรูปแบบทรานส์ไอโซเมอร์และซิสไอโซเมอร์.....	10
2.8 กระบวนการเมตาบอลิซึมขั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิในพืช.....	12
2.9 กราฟอัตราการทำแห้ง.....	16
2.10 แผนภูมิไฮโครเมตริก.....	19
2.11 ความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้กับความชื้นวัสดุ.....	21
2.12 ประเภทของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	24
2.13 เครื่องทำแห้งแบบ Atmospheric double drum dryer.....	25
2.14 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งประเภท Atmospheric single drum dryer.....	25
2.15 เครื่องทำแห้งแบบ Atmospheric twin drum dryer.....	26
2.16 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Nip feeding.....	26
2.17 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Roll feeding.....	27
2.18 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Dip feeding.....	28
2.19 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ spray feeding.....	28
2.20 กลไกการทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง.....	29
3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบฟักข้าว.....	42
3.2 ขั้นตอนการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	43
3.3 ไดอะแกรมเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่.....	43
4.1 ฟักข้าวสดที่ใช้ในการศึกษา.....	49
4.2 ฟักข้าวผงที่ได้จากการทดลอง.....	50
4.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อผลผลิตผงที่ได้.....	57
4.4 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อความชื้น.....	59
4.5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อวอเตอร์แอกทิวิตี้.....	61
4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อค่าความเป็นสี.....	

เอกสารนี้เป็นเอกสารแต่ง... 63 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อค่าความสว่าง....	64
4.8 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อการเปลี่ยนแปลงสี.....	65
4.9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อความสามารถการละลาย.....	67
4.10 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อการดูดกลับความชื้น.....	69
4.11 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินต่อสารประกอบพีนอลิกทั้งหมด.....	71
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการทำแห้งและมอลโตเด็กซ์ตรินต่อปริมาณไลโคปีน.....	73
4.13 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธี Superimposing graphical method.....	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสถานการณ์ปัจจุบันมีผู้ป่วยเป็นโรคเรื้อรังหลายชนิดเป็นจำนวนมากและมีอัตราการเกิดโรคที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ โรคมะเร็ง โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดและหัวใจ โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น (สำนักโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค, 2559; กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2560) การรับประทานอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและมีความปลอดภัยสามารถช่วยส่งเสริมสุขภาพให้แข็งแรงและลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคได้ แต่เนื่องด้วยยุคสมัยที่แปรเปลี่ยน ทำให้คนในสังคมปัจจุบันนิยมอาหารที่มีความสะดวกรวดเร็ว ทำให้การบริโภคผักและผลไม้ลดลง อีกทั้งในกลุ่มผู้สูงอายุที่มีอัตราการบริโภคผักและผลไม้ลดลงเนื่องจากปัญหาเรื่องของการขบเคี้ยว โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพและสำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติพบว่า ประชากรไทยผู้สูงอายุกลุ่มอายุ 80 ปีขึ้นไปบริโภคผักและผลไม้ไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีการส่งเสริมให้คนไทยหันมาเลือกรับประทานโดยการเพิ่มการบริโภคพืช ผัก ผลไม้ที่อุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่าง ๆ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก วิตามิน รังควัตถุประเภทต่าง ๆ เช่น รังควัตถุในกลุ่มของแคโรทีนอยด์ เช่น ไลโคปีน เบต้า-แคโรทีน เป็นต้น (สถาบันโภชนาการ, 2557)

พริกขี้หนูจัดเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการเนื่องจากมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูง โดยเฉพาะแคโรทีนอยด์ประเภทไลโคปีนและเบต้าแคโรทีน รวมทั้งกรดไขมันและแอลฟาโทโคฟีรอล นอกจากนี้ยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารโพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์มากกว่าผลไม้หลายชนิด (Kha *et al.*, 2013; Chuyen *et al.*, 2015) ซึ่งสารดังกล่าวสามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดมะเร็ง โรคเกี่ยวกับหัวใจและหลอดเลือดรวมถึงโรคเรื้อรังต่าง ๆ ได้ (Kubola and Siriamornpun, 2011) อีกทั้งผลพริกขี้หนูยังเป็นพืชที่กำลังได้รับความนิยมและสามารถปลูกได้ดีในเขตร้อน พริกขี้หนูเป็นพืชอยู่ในวงศ์แตงและมะระ มีถิ่นกำเนิดในประเทศทางตอนใต้และตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย ได้แก่ ประเทศเวียดนาม จีน อินเดียและประเทศไทย (Chuyen *et al.*, 2015) จากการสำรวจข้อมูลพริกขี้หนูในประเทศไทย พบว่าพริกขี้หนูมีหลายสายพันธุ์ขึ้นกับแหล่งปลูก เช่น พันธุ์ KKU ac. 10-038, พันธุ์ KKU ac.10-087, KKU ac.11-158, BM 0054, KKU ac.10-019 เป็นต้น (ณัฐยาพร หนันตะและคณะ, 2559) การปลูกพริกขี้หนูเชิงการค้าส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ราชบุรี กาญจนบุรี นครราชสีมา สุรินทร์ เชียงใหม่ สกลนคร โดยมีนครปฐมเป็นแหล่งปลูกสำคัญและได้มีการจัดตั้งกลุ่มเกษตรกรปลูกพริกขี้หนูไทยพัฒนาเพื่อการส่งออกและแปรรูปผลิตภัณฑ์ (ศุภกิจ ต้นวิบูลย์ศักดิ์, 2554) ปัจจุบันปริมาณการผลิตพริกขี้หนูในประเทศไทยมีแนวโน้มการผลิตเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยทั่วไปผลผลิตพริกขี้หนูสดมีอายุการเก็บสั้น จึงได้มีการนำพริกขี้หนูไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ในลักษณะเครื่องดื่ม เช่นเดียวกับน้ำผลไม้พาสเจอร์ไรซ์ นอกจากนั้นยังมีการสกัดน้ำมันจากพริกขี้หนู (Kha *et al.*, 2013) และการทำแห้งพริกขี้หนู มีรายงานการศึกษาการทำแห้งพริกขี้หนูด้วยวิธีการทำแห้งแบบสุญญากาศ แบบลมร้อนและแบบฟั่นฝอยและได้ทำศึกษาลักษณะของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้ (Kha *et al.*, 2010; Mai *et al.*, 2013; Minh, 2014) การแปรรูปพืชผักผลไม้ให้มีลักษณะเป็นผงแห้ง

ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา สะดวกต่อการนำไปใช้และยังคงคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์นั้น การทำแห้งอาหารสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำแห้งแบบพ่นฝอย การทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์เบด การทำแห้งแบบระเหิด (Suger and Suresh, 2010) โดยการแปรรูปโดยวิธีต่างๆดังที่กล่าวมานั้น อาจมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูงอาจทำให้ได้ต้นทุนผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูงซึ่งอาจทำให้ประชาชนบางกลุ่มนั้นเข้าไม่ถึงผลิตภัณฑ์ และบางวิธีใช้เวลานานซึ่งส่งผลให้สีและคุณค่าทางโภชนาการลดลง การนำเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมาประยุกต์ใช้ในการทำแห้งผลไม้ เช่น ขนุน แก้วมังกร มะขาม แอปเปิลกล้วย เป็นต้น นั้นได้เป็นผลดี (นฤติ พงศ์วิฑูร และคณะ, 2544; Pua *et al.*, 2010; Jittanit *et al.*, 2011; Henriquez *et al.*, 2014; Chia and Chong, 2015) เนื่องจากการทำแห้งแบบลูกกลิ้งอาศัยหลักการทำอาหารให้เป็นแผ่นฟิล์มเคลือบบนลูกกลิ้งร้อนภายในระยะเวลาสั้น การทำแห้งด้วยวิธีการนี้ให้อัตราการทำแห้งสูง คุณภาพอาหาร สามารถควบคุมการผลิตง่ายและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งวิธีอื่น (Sagar and Kumar, 2010) และจากการที่ฟักข้าวมีลักษณะเนื้อที่มีเส้นใยและความเหนียว ทำให้เป็นข้อจำกัดในการทำแห้ง การทำแห้งแบบลูกกลิ้งจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบผงแห้งสามารถนำไปใช้เป็นอาหารหรือส่วนผสมของอาหารได้ในหลายรูปแบบ เช่น เครื่องดื่มผง สารให้กลิ่นรส สีสผสมอาหาร นอกจากนั้นฟักข้าวยังมีสมบัติที่โดดเด่นด้านสี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และมีกลิ่นรสเป็นลักษณะเฉพาะ จึงควรได้นำมาศึกษาแนวทางในการแปรรูปเพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจในอุตสาหกรรมอาหารและได้รับความนิยมจากผู้บริโภค แต่อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วยลูกกลิ้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงที่มีคุณลักษณะดีนั้น ขึ้นกับปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น อุณหภูมิทำแห้ง ระยะเวลาที่ใช้ทำแห้ง สภาพและองค์ประกอบของวัตถุดิบเริ่มต้น ปริมาณสารช่วยทำแห้งที่ใช้ (Bhusari *et al.*, 2014) เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทำแห้งและสมบัติของผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ได้เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคนิคการทำแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการประยุกต์วิธีการแปรรูปด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้งกับผลผลิตฟักข้าว เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเก็บรักษาได้นานและสะดวกต่อการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบอาหาร เช่น สีสผสมอาหาร อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตฟักข้าวในอนาคต

จากการศึกษาข้อมูลดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการแปรรูปฟักข้าว และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟักข้าวผงโดยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแปรรูปฟักข้าวให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น นำไปบริโภคสะดวก และให้ประโยชน์ต่อผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพอีกทั้งการแปรรูปให้อยู่ในสภาพผงแห้งนั้น สามารถนำไปใช้เป็นอาหารทางเลือกหรือส่วนผสมของอาหารสำหรับผู้สูงอายุที่มีปัญหาในการบดเคี้ยวอาหารประเภทผักผลไม้ ช่วยป้องกันและลดอัตราการเกิดโรคต่าง ๆ ที่นำไปสู่ปัญหาสุขภาพของคนไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องและหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟักข้าวผงโดยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง ประกอบด้วย ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี้ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของฟักข้าวผง ค่า

ความสามารถในการละลาย ค่าการดูดกลับความชื้น ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตฟักข้าวผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่
- 1.3.2 ตัวแปรที่ศึกษา ประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน และ ปริมาณกัมอะราบิก
- 1.3.3 สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวผงที่ศึกษา ประกอบด้วย ปริมาณผลผลิตที่ได้ ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอคทีวิตี ค่าสี ความสามารถในการละลาย การดูดกลับความชื้น ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และค่าปริมาณไลโคปีน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 เพื่อทราบถึงกรรมวิธีการผลิตฟักข้าวผงอบแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง
- 1.4.2 เพื่อทราบถึงผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวผงที่ศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟักข้าว

ฟักข้าวเป็นผลไม้เขตร้อน อยู่ในวงศ์แตงและมะระ (Cucurbitaceae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Momordica cochinchinensis* Spreng. มีถิ่นกำเนิดในประเทศทางตอนใต้และตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย ได้แก่ ประเทศเวียดนาม จีน อินเดียและประเทศไทย ในแต่ละประเทศมีการเรียกชื่อฟักข้าวที่แตกต่างกันออกไปตามภูมิประเทศ ดังตารางที่ 2.1 (Chuyen *et al.*, 2015) การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของฟักข้าวแต่ละประเทศนั้นก็มีความแตกต่างกัน มีงานวิจัยศึกษาการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของฟักข้าวสองสายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ไทยและเวียดนาม พบว่า ฟักข้าวสายพันธุ์ไทยสามารถให้ผลผลิตได้ตลอดปี ในขณะที่สายพันธุ์เวียดนามให้ผลผลิตได้เฉพาะเดือนเมษายนถึงเดือนกรกฎาคม นอกจากนี้ฟักข้าวสายพันธุ์ไทยยังมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าให้ผลผลิตมากกว่าฟักข้าวสายพันธุ์เวียดนามมากกว่า 7 เท่า (ยุทธนา บรรจง และคณะ, 2553) ผลฟักข้าวมีลักษณะเปลือกกลมหรือผลรี ที่ผิวเปลือกมีหนามเล็ก ๆ ปกคลุมทั่วทั้งผล มีสีเขียวถึงสีแดงตามระดับความสุกจากผลอ่อนไปผลสุก การใช้ประโยชน์จากฟักข้าวนั้นก็มีความหลากหลายในการใช้ที่แตกต่างกัน เช่น ฟักข้าวผลอ่อนสีเขียว นิยมนำมาต้มหรือลวกให้สุกใช้รับประทานคู่กับน้ำพริกหรือนำไปประกอบอาหารประเภทแกง ส่วนฟักข้าวผลสุก นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น น้ำฟักข้าวพร้อมดื่ม สารให้สีในอาหาร รวมไปถึงผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นต้น (Bhumsaidon and Chamchong, 2016; Kubola and Siriamornpun, 2011)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของฟักข้าว

ต้นฟักข้าวเป็นพืชประเภทพืชล้มลุก มีลักษณะลำต้นเป็นไม้เถามีอายุได้นานถึง 50 ปี ลักษณะของใบเป็นใบเดี่ยวเรียงเวียนสลับกัน แผ่นใบเว้าเป็นรูปหัวใจหรือรูปไข่ 3-5 แฉกความกว้างยาวเท่ากันประมาณ 6-9 เซนติเมตร ดอกของฟักข้าวจะออกในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคมและสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ ดอกฟักข้าวมีสีขาวนวลหรือขาวเหลืองออกบริเวณข้อต่อระหว่างใบหรือตามซอกใบ ก้านเกสรและกลีบละอองมีสีม่วงแกมดำหรือน้ำตาลแกมม่วง ดอกเพศผู้และดอกเพศเมียอยู่ต่างต้นกันโดยดอกเพศผู้จะมีกลีบดอกสีเหลือง 5 กลีบ ส่วนดอกเพศเมียจะมีขนาดเล็กกว่า (ยุทธนา บรรจง และคณะ, 2553; ธมนวรรณ ปันแก้ว และคณะ, 2559; มารีนา มะหิ และคณะ, 2557; ฉวีวรรณ สุดจิตร์, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ดอกฟักข้าวเทศเมืง



ข) ดอกฟักข้าวเทศผู้

รูปที่ 2.1 ดอกฟักข้าว ก) ดอกฟักข้าวเทศเมืง ข) ดอกฟักข้าวเทศผู้

ที่มา: ฉวีวรรณ สุจริต, 2558

ตารางที่ 2.1 ชื่อของฟักข้าวตามภูมิภาค

ภาษา	ชื่อฟักข้าว
Latin	Momordica cochinchinensis spreng. Muricia cochinchinensis Lour.
English	Chinese bitter cucumber Spiny bitter gourd Cochinchin gourd
Chinese	Mu bie Mu bie zi Teng tong Tu mu bie
Vietnamese	Gac Moc miet tu
Thai	Bat-khai-du Phak-khao
Hindu	Bhat-karela Gangerua Kakrol Kantola
Laos	Khaawz
Malais	Teruah
tagalog	Buyok-buyok Sugod-sugod

ที่มา: Chuyen *et al.*, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ผลของฟักข้าวมีรูปร่างกลมรี มีหนามเล็ก ๆ รอบ ๆ ผล ผลฟักข้าวมีขนาดกว้าง 6-9 เซนติเมตร ยาว 10-14 เซนติเมตร ผลอ่อนมีสีเขียวหรือสีเขียวอมเหลือง เมื่อสุกผลจะมีส้มแดงหรือสีแดง โดยการจำแนกองค์ประกอบหลักทั่วไปของฟักข้าวสามารถจำแนกได้เป็น 4 องค์ประกอบหลัก

ประกอบด้วย เมล็ด เนื้อผล เยื่อหุ้มเมล็ดและเปลือก ดังรูปที่ 2.2 ส่วนเนื้อผลเป็นส่วนที่มีน้ำหนักมากที่สุด ประมาณ 49% โดยน้ำหนัก ในขณะที่เยื่อหุ้มเมล็ดมีเพียง 18% โดยน้ำหนัก (Kha *et al.*, 2013) นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาปริมาณส่วนประกอบของฟักข้าวในแต่ละส่วน ดังตารางที่ 2.2 และรายงานว่าในฟักข้าวสดมีเมล็ดผลเฉลี่ยเท่า 28 เมล็ดต่อผล (Ishida *et al.*, 2004)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของฟักข้าว

ส่วนประกอบของฟักข้าว	น้ำหนัก (%)
ทั้งผล	100.00
เมล็ด	16.80
เนื้อผล	48.40
เยื่อหุ้มเมล็ด	24.60
เปลือก	7.10
เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน	2.90

ที่มา: Ishida *et al.*, 2004



รูปที่ 2.2 ลักษณะของฟักข้าว 1) เมล็ด 2)เนื้อผล 3)เนื้อเยื่อหุ้มเมล็ด 4)เปลือก

ที่มา: Chuyen *et al.*, 2015

ฟักข้าวที่ระดับความสุกต่างกันมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน ระยะความสุกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความคงตัวและปริมาณสารสำคัญ (ปาริชาติ ปาระทั่ง และคณะ, 2012) โดยม้งานวิจัยที่ศึกษาผลของระดับความสุกของฟักข้าวต่อปริมาณสารสำคัญในฟักข้าว เช่น อภิญญา ภูมิ สายดอน และมนต์ทิพย์ ชำของ (2555) ได้ศึกษาผลของระยะเก็บเกี่ยว 3 ระยะ คือ ระยะผลเปลี่ยนสี ระยะผลสุก ปานกลางและระยะผลสุกเต็มที่ ต่อปริมาณสารไลโคปีนที่สกัดจากเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวพบว่าทั้ง 3 ระยะมีปริมาณสารไลโคปีนที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยของ Kubola (2011) ได้แบ่งการสุกของผลฟักข้าวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ (Kubola and Siriamornpun, 2011) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของผลฟักข้าวตามระดับความสุก

ระดับความสุก	ลักษณะทางกายภาพ
อ่อน	อายุผลประมาณ 110-120 วัน มีเปลือกสีเขียว เนื้อผลสีขาว เมล็ดโปร่งขนาดเล็ก
ปานกลาง	อายุผลประมาณ 120-130 วัน มีเปลือกสีเหลือง เนื้อผลสีเหลืองสว่าง เมล็ดสีขาว
สุก	อายุผลประมาณ 140-150 วัน มีเนื้อผลสีส้ม เยื่อหุ้มเมล็ดสีแดง และ เมล็ดสีดำ

ที่มา: Kubola and Siriamornpun, 2011



ก) ผลอ่อน

ข) สุกปานกลาง

ค) สุกเต็มที่

รูป 2.3 ฟักข้าวที่ความสุกระดับต่างๆ

ที่มา: Win et al., 2015

2.1.2 คุณค่าทางโภชนาการของฟักข้าว

ฟักข้าวเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งประกอบไปด้วย น้ำ พลังงาน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน โยอาหารและเส้นใย รวมถึงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น แคโรทีนอยด์ (เบต้าแคโรทีนและไลโคปีน) กรดไขมัน วิตามินอี (แอลฟา โทโคฟีรอล) และสารประกอบฟีนอลิก

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางโภชนาการของฟักข้าว ต่อ 100 กรัม

ส่วนประกอบ	เนื้อผล	เยื่อหุ้มเมล็ด
น้ำ	90.2%	77.0%
พลังงาน	29.0 Kcal	125.0 Kcal
คาร์โบไฮเดรต	6.4 g	10.5 g
โปรตีน	0.6 g	2.1 g
ไขมัน	0.1 g	7.9 g
ใยอาหาร	1.6 g	1.8 g
เกลือ	-	0.7 mg

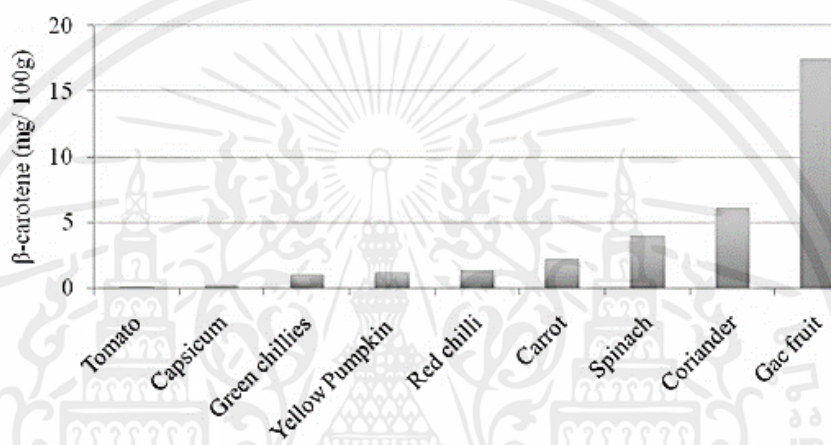
ที่มา: Minh, 2014

2.1.2.1 แคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นสารประกอบรงควัตถุที่เกิดจากการสังเคราะห์จากพืชและจุลินทรีย์ ผักและผลไม้ที่ส่วนใหญ่ที่เป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์จะมีสีเหลืองส้มและสีแดง แคโรทีนอยด์มีประโยชน์ในการช่วยป้องกันการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคเกี่ยวกับหลอดเลือด โรคมะเร็ง โรคเรื้อรังต่างๆ อีกทั้งยังเป็นแหล่งของการพบวิตามินเอ แคโรทีนอยด์ที่พบได้ในธรรมชาติมีประมาณ 600 ชนิด และมี

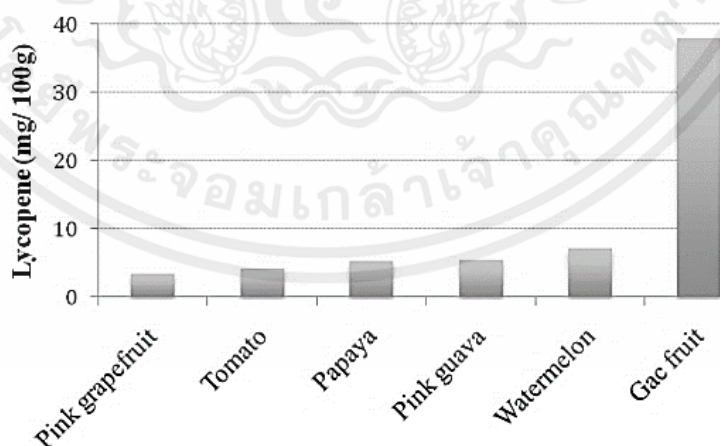
ประมาณ 40 ชนิดที่พบได้ในอาหาร โดยส่วนใหญ่จะเป็นแคโรทีนอยด์ประเภท เบต้าแคโรทีน แอลฟาแคโรทีน ไลโคปีน ลูทีน และคริปโทแซนทิน (Rao and Rao, 2007)

ผักข้าวสาคุดมไปด้วยรงควัตถุประเภทแคโรทีนอยด์ โดยเฉพาะไลโคปีนและเบต้าแคโรทีน ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเหลือง สีส้มและสีแดง มีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนในผักข้าวเป็นจำนวนมากดัง ตารางที่ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเบต้าแคโรทีนในผักข้าวกับปริมาณเบต้าแคโรทีนในแครอทพบว่าในผักข้าวมีปริมาณเบต้าแคโรทีนที่สูงกว่าแครอท 8 เท่า ดังรูปที่ 2.4 และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณไลโคปีนในผักข้าวกับผลไม้ชนิดอื่น ได้แก่ เกรฟฟрут มะเขือเทศ มะละกอฝรั่ง และแตงโม พบว่า ผักข้าวมีปริมาณไลโคปีนที่สูงกว่าผลไม้ชนิดอื่นมากกว่า 5 เท่า ดังรูป ที่ 2.5 (Kha *et al.*, 2013)



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงข้อมูลปริมาณเบต้าแคโรทีนของผลไม้ชนิดต่างๆ

ที่มา: Kha *et al.*, 2013



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงข้อมูลปริมาณไลโคปีนของผลไม้ชนิดต่างๆ

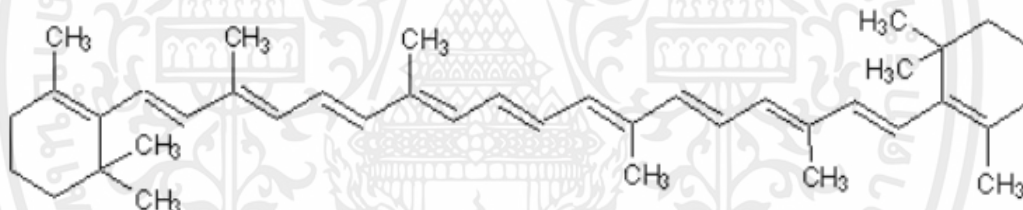
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ ที่มา: Kha *et al.*, 2013 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ปริมาณไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนในผักข้าว

ปริมาณไลโคปีน	ปริมาณเบต้าแคโรทีน	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
0.18-0.50mg/g น้ำหนักฐาน เป็ยก	0.22-0.39mg/g น้ำหนัก ฐานเป็ยก	วิเคราะห์ด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	Bhumsaidon and Chamchong, 2016
0.28-0.45 mg/g น้ำหนัก ฐานเป็ยก	0.21-0.33 mg/g น้ำหนัก ฐานเป็ยก	วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	Tran <i>et al.</i> , 2016
0.38 mg/g น้ำหนักฐานเป็ยก	0.12 mg/g น้ำหนักฐานเป็ยก	วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	Aoki <i>et al.</i> , 2002
2.01 mg/g น้ำหนักฐานเป็ยก	0.82 mg/g น้ำหนักฐานเป็ยก	วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	Ishida <i>et al.</i> , 2004

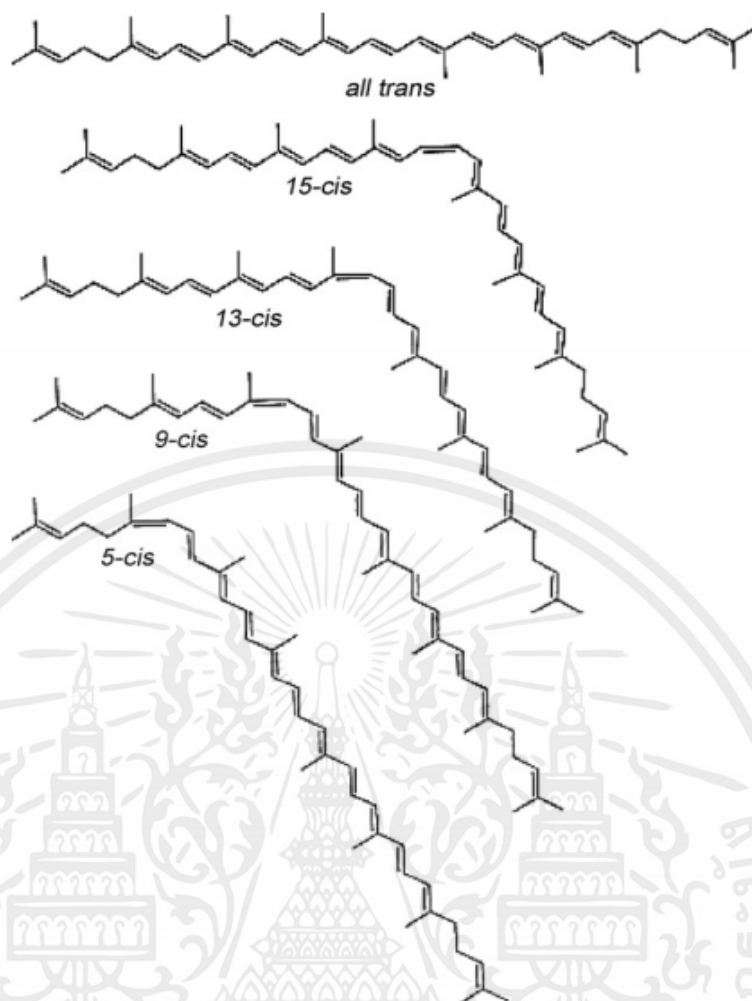
เบต้าแคโรทีนเป็นรงควัตถุสีส้มที่ไวต่อความร้อน แสง และออกซิเจน มีสมบัติช่วยป้องกันการเกิดโรคหัวใจและมะเร็ง (Nezzomo and Ferreira, 2016) เบต้าแคโรทีนเป็นโปรวิตามินซึ่งกลไกของร่างกายจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโปรวิตามินเอ เบต้าแคโรทีนสามารถพบได้ในผักผลไม้หลายชนิด ได้แก่ บัทรูท แคนตาลูป แครอท ฟักทอง มะเขือเทศ มะม่วง มะละกอ ผักใบเขียว เช่น กระหล่ำปลี บลอคโคลี (Eldahshan and Singab, 2013)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเบต้าแคโรทีน
ที่มา: Technical Evaluation Report, 2012

ไลโคปีนเป็นหนึ่งในแคโรทีนอยด์ที่พบได้ในธรรมชาติ ไลโคปีนเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดงพบมากในผักผลไม้พวกมะเขือเทศสุก แตงโม เกรฟฟรุตสีชมพู มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรครีรัง โรคมะเร็ง และโรคหลอดเลือดหัวใจ โครงสร้างทางเคมีของไลโคปีนมีโครงสร้างแบบไม่เป็นวง (acyclic carotenoid) โดยปกติแล้วอยู่ในรูปของโครงสร้างแบบทรานส์ (all trans configuration) มีพันธะคู่ 11 ตำแหน่ง แต่ไลโคปีนนั้นสามารถเปลี่ยนโครงสร้างไปอยู่ในรูปแบบโครงสร้างแบบซิสได้ (cis isomer) ในตำแหน่งที่ 5, 9, 13 หรือ 15 (Rao and Rao, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของไลโคปีนในรูปแบบทรานส์ไอโซเมอร์และซิสไอโซเมอร์
ที่มา: Rao and Rao, 2007

2.1.2.2 กรดไขมัน

ในผักขาวมีกรดไขมันที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพซึ่งมีหน้าที่ดูดซับสารจำพวกแคโรทีนและสารอาหารอื่น ๆ ที่มีสมบัติละลายได้ในไขมัน กรดไขมันที่สามารถพบได้ในผักขาวมีหลายชนิด รวมถึงกรดไขมันจำเป็นแสดงดังตารางที่ 2.6 ได้แก่ กรดไขมันโอเลอิก ลิโนเลอิก และแอลฟาไลโนเลอิก ซึ่งร่างกายมนุษย์ไม่สามารถสร้างหรือสังเคราะห์กรดไขมันจำเป็นได้เอง ต้องได้รับการบริโภคอาหารเท่านั้น มีการศึกษาว่ากรดไขมันจำเป็นมีประโยชน์ต่อสุขภาพมนุษย์ เช่น ช่วยลดภาวะเกิดโรคเกี่ยวกับหลอดเลือดและหัวใจ โรคเกี่ยวกับสุขภาพตาและช่วยส่งเสริมสุขภาพของสตรีมีครรภ์และเด็ก ผักขาวมีปริมาณกรดไขมัน 102 mg/g (Kha *et al.*, 2013; Aebex *et al.*, 2015)

2.1.2.3 วิตามินอี

วิตามินอี หรือ แอลฟาโทโคฟีรอลเป็นวิตามินที่มีสมบัติละลายได้ในไขมัน เป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ ช่วยป้องกันการเกิดโรคเกี่ยวกับหลอดเลือด โรคหลอดเลือดหัวใจและชะลอการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease) และยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันจากเยื่อหุ้มเมล็ดผักขาว โดยในผลผักขาวมีปริมาณวิตามินอี 76 µg/g (Kha *et al.*, 2013)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของกรดไขมันในเยื่อหุ้มพืชข้าว

กรดไขมัน	ความเข้มข้น (mg/g, FW)	ร้อยละของกรดไขมันทั้งหมด
กรดไมริสติก (Myristic)	0.89	0.87
กรดปาลมิติก (Palmitic)	22.48	22.04
กรดปาลมิตอเลอิก (Palmitoleic)	0.27	0.26
กรดสเตียริก (Stearic)	7.20	7.06
กรดโอเลอิก (Oleic)	34.76	34.08
กรดคริส-แวกซีนิก (Cis-vaccenic)	1.15	1.13
กรดไลโนเลอิก (Linoleic)	32.06	31.43
กรดแอลฟา-ไลโนเลอิก (α -Linoleic)	2.18	2.14
กรดอะราคิติก (Arachidic)	0.40	0.39
กรดกาโดเลอิก (Gadoleic)	0.15	0.15
กรดอะราคิโดนิก (Arachidonic)	0.10	0.10
กรดเบฮีนิก (Behenic)	0.19	0.19
กรดลิกโนซีริก (Lignoceric)	0.14	0.14
รวม	101.98	

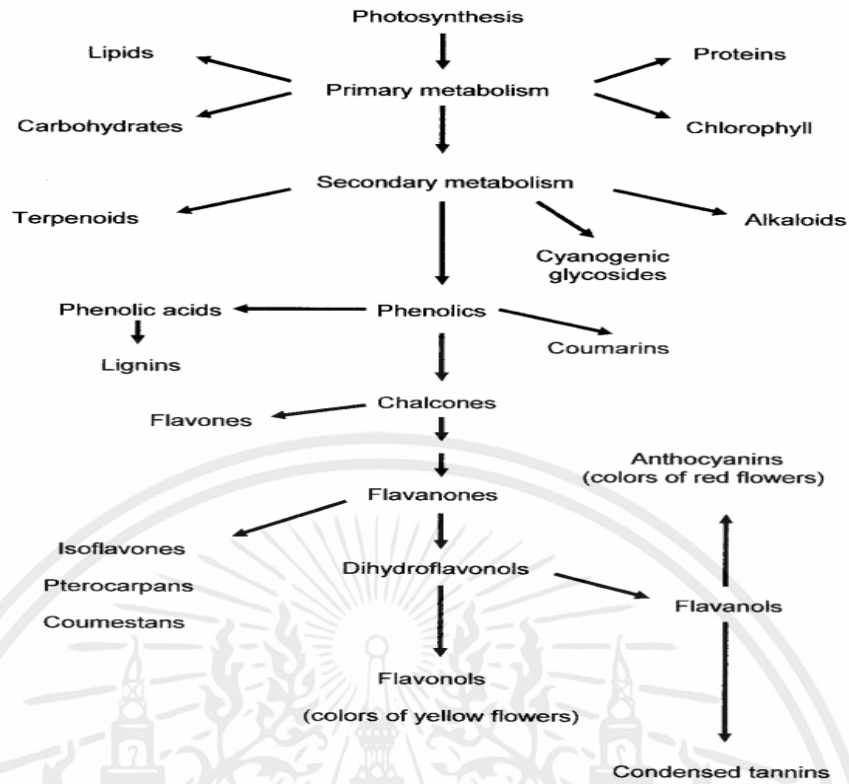
ที่มา: Kha *et al.*, 2013

2.1.2.4 สารประกอบฟีนอลิก

กรดฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่พบในพืชข้าวเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ในผลพืชข้าวที่มีสารประกอบดังกล่าวประมาณ 1.5 ถึง 4.3 mg/g น้ำหนักแห้ง ที่เยื่อหุ้มเมล็ดของพืชข้าวเป็นส่วนประกอบที่พบกรดฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์มากที่สุด พบมากถึง 4.3 และ 2.1 mg/g ตามลำดับ (Kha *et al.*, 2013) ปัจจุบันสารประกอบฟีนอลิกจากธรรมชาติได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกสามารถพบได้ในพืช สารประกอบเหล่านี้มีสมบัติในการช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรค เนื่องจากมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยทั่วไปกระบวนการเมตาบอลิซึมในพืชสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นปฐมภูมิ และขั้นทุติยภูมิ ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประกอบกลุ่มใหญ่ที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมขั้นทุติยภูมิ ดังรูป 2.8 เพื่อสังเคราะห์สารสำคัญในการเจริญและบำรุงรักษาเซลล์ เช่น ลิพิด โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และกรดนิวคลีอิก

ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกโดยทั่วไป ประกอบด้วยวงแหวนแอโรมาติกที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือมีการเชื่อมพันธะกับโมเลกุลอื่น เช่น น้ำตาลและโปรตีน สารประกอบฟีนอลิกมีความสำคัญอย่างมากต่อลักษณะทางกายภาพและกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์รวมถึงการแสดงถึงฟังก์ชันต่างๆในพืช เช่น สมบัติทางประสาทสัมผัส (สี กลิ่น รสชาติและความฝาด) โครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการผสมเกสรของดอกไม้ ความต้านทานต่อศัตรูพืช กระบวนการเพาะงอกของเมล็ด และการเจริญเติบโต เกณฑ์ในการจำแนกกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิกมีหลายวิธี เนื่องจากความแตกต่างกันของโครงสร้างตั้งแต่อยู่ในรูปของโมเลกุลอย่างง่ายจนถึงสารประกอบพอลิเมอร์ หากใช้เกณฑ์การแบ่งโดยใช้สายคาร์บอนในสารประกอบเป็นเกณฑ์จะสามารถแบ่งได้ 16 กลุ่ม ดังตารางที่

2.7



รูปที่ 2.8 กระบวนการเมตาบอลิซึมขั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิในพืช
ที่มา: Giada, 2013

ตารางที่ 2.7 ประเภทของสารประกอบฟีนอลิกจำแนกโดยใช้สายคาร์บอนเป็นเกณฑ์

ประเภท	สายคาร์บอน
ฟีนอลในรูปร่างง่าย (Simple phenols)	C ₆
เบนโซควิโนน (Benzoquinones)	C ₆
กรดฟีนอลิก (Phenolic acids)	C ₆ -C ₁
อะซีโตฟีโนน (Acetophenones)	C ₆ -C ₂
กรดฟีนิลแอซีติก (Phenylacetic acids)	C ₆ -C ₂
กรดไฮดรอกซีซินนามิก (hydroxycinnamic acids)	C ₆ -C ₃
ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropenes)	C ₆ -C ₃
คูมารินและไอโซคูมาริน (Coumarins, isocoumarins)	C ₆ -C ₃
โครโมน (Chromones)	C ₆ -C ₃
แนฟโทควิโนน (Nepthoquinones)	C ₆ -C ₄
แซนโทน (Xanthones)	C ₆ -C ₁ C ₆
สติลบีน (Stibenens)	C ₆ -C ₂ -C ₆
แอนทราควิโนน (Anthraquinones)	C ₆ -C ₂ -C ₆
ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)	C ₆ -C ₃ -C ₆
ลิกแนน และ นิวโอลิกแนน (Lignans and neolignans)	(C ₆ -C ₃) ₂
ลิกนิน (Lignins)	(C ₆ -C ₃) _n

ที่มา: Giada, 2013

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ลิกแนน และ นิวโอลิกแนน (Lignans and neolignans) ถึงเจ้าของเอกสารทุกฉบับให้นำไปใช้

นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลิกในธรรมชาติ ยังสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม กลุ่มแรกมีโครงสร้างอย่างสั้น ได้แก่ ฟีนอล ไพรโอแคทีทอล ไฮโดรควิโนน รีซอร์ซินอล อนุพันธ์อัลดีไฮด์ จากกรดเบนโซอิก ซึ่งประกอบกันอยู่ในรูปแบบของน้ำมันหอมระเหย เช่น วานิลลิน กลุ่มที่สอง มีโครงสร้างอย่างกว้าง แบ่งได้เป็นกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) และอนุพันธ์ Flavonoid, coumarins และ กรดฟีนอลิก เช่น กรดเบนโซอิก และ กรดซินนามิกและอนุพันธ์กรดซินนามิก กลุ่มที่สาม ได้แก่ กลุ่มประเภทยพอลิเมอร์ ได้แก่ แทนนิน และ ลิกนิน สมบัติในการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกมีความสัมพันธ์ต่อการส่งเสริมสุขภาพของมนุษย์ ในแง่ของการป้องกันโรคต่างๆ นอกจากนี้สารประกอบเหล่านี้อาจจะถูกนำไปใช้เพื่อการรักษาสุขภาพ เนื่องจากมีสมบัติทางเภสัชวิทยา

1. กลุ่มสารประกอบฟีนอลิกที่สำคัญ

ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก ขึ้นอยู่กับความหลากหลายของโครงสร้างทางเคมี สารประกอบฟีนอลิกที่มีบทบาทสำคัญด้านการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ แทนนิน ซาลิโคน คูมาริน และกรดฟีนอลิก

ก) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid)

ตามโครงสร้างของฟลาโวนอยด์ มีอันดับปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน และมีพันธะคู่ในวงแหวนเฮเทอโรไซคลิกไพโรน ทำให้ฟลาโวนอยด์สามารถจำแนกได้อีก 13 ชนิด โดยฟลาโวนอยด์ที่มีบทบาทที่สำคัญ ได้แก่ ฟลาโวนอล (Flavonols) ฟลาวานอล (Flavanols) ฟลาโวน (Flavones) ฟลาวาโนน (Flavanones) ไอโซฟลาโวน (Isoflavones) และแอนโทไซยานิน (Anthocyanins) นอกจากนี้ฟลาโวนอยด์ยังสามารถเกิดขึ้นเป็นซัลเฟตและอนุพันธ์ของ เมทิลเลท

ข) แทนนิน (Tannins)

แทนนินเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Balasundram *et al.*, 2006) สารประกอบฟีนอลิกประเภทแทนนินสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ประเภทไฮโดรไลซ์แทนนิน ประกอบด้วย พอลิเมอร์ของ Ellagic acid หรือ Gallic acid และ Ellagic acid กับกลูโคส เกิดเป็นสารประกอบ Ellagitannin และ Gallotannins และประเภทที่สอง คือ condensed tannins ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการควบแน่นของมอนอเมอร์ flavan-3-ol นอกจากนี้ยังมีแทนนินอีกประเภทหนึ่งพบได้ในเฉพะาสาหร่ายสีน้ำตาลซึ่งมนุษย์ไม่นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหาร เรียกว่า phlorotannins (Pereira *et al.*, 2009)

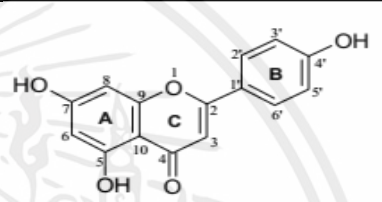
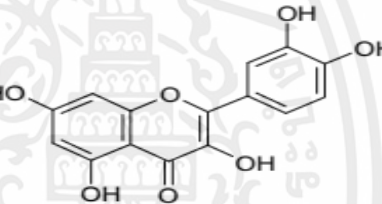
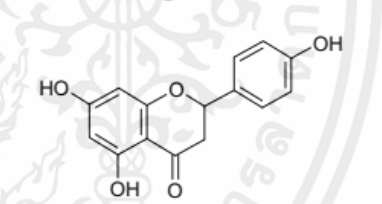
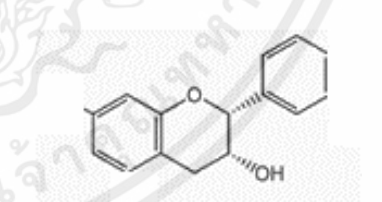
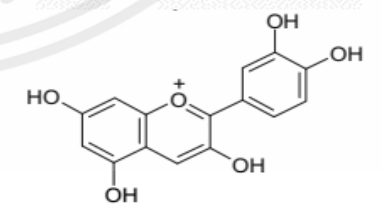
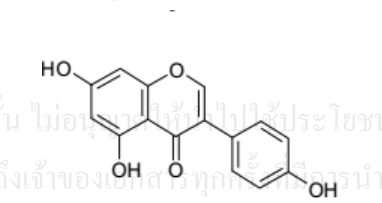
ค) ซาลิโคนและคูมาริน (chalcones and Coumarins)

ซาลิโคน เป็นสารตัวกลางในกระบวนการชีวสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ phloretin 2'-o-glucose, chalconaringenin และ arbutin พบได้ในอาหารหลายประเภท ได้แก่ phloretin และ phloridzin เป็นสารสำคัญที่มีความโดดเด่นในแอปเปิ้ล chalconaringenin เป็นสารที่โดดเด่นในมะเขือเทศและ arbutin พบมากในลูกแพร์ Coumarins เป็นอนุพันธ์ cinnamic acid พบมากประมาณ 1300 ชนิด เป็นผลผลิตที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมขั้นทุติยภูมิพบได้มากในธรรมชาติในรูปของไกลโคไซด์ เช่น umbelliferone, esculetin และ scopoletin ส่วนมากพบในน้ำมันมะกอก ข้าวโอ๊ต และเครื่องเทศ

ง) กรดฟีนอลิก (Phenolic acids)

กรดฟีนอลิกสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกได้แก่กลุ่มของกรดเบนโซอิก กรดเบนโซอิกมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 7 อะตอม (C_6-C_1) และเป็นกรดฟีนอลิกอย่างง่ายที่พบในธรรมชาติ ประกอบด้วย salicylic acid, gentisic acid, p-hydroxybenzoic acid, protocatechuic acids, vanillic acids, gallic acid และ syringic acid กลุ่มที่สองได้แก่ กลุ่มของ cinnamic acids ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอม จำนวน 9 อะตอม ประกอบด้วย Cinnamic acid, o-coumaric acid และ sinapic acid กรดฟีนอลิกพบมากประมาณ 1 ใน 3 ของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่พบในอาหารมนุษย์ มีความเป็นสารต้านอนุมูลอิสระสูง

ตารางที่ 2.8 โครงสร้างของเคมีของฟลาโวนอยด์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของฟลาโวนอยด์	โครงสร้างทางเคมี
ฟลาโวน (Flavones)	
ฟลาโวนอล (Flavonols)	
ฟลาวาโนน (Flavanones)	
ฟลาวานอล (Flavanols)	
แอนโทไซยานิน (Anthocyanins)	
ไอโซฟลาโวน (Isoflavones)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งก่อนนำไปใช้

2. แหล่งที่พบสารประกอบฟีนอลิกและผลของสารประกอบฟีนอลิกต่อสมบัติของอาหาร

ตามที่หน่วยงานวิจัยทางการเกษตรของกระทรวงการเกษตรสหรัฐฯ (Agricultural Research service) ได้รายงานข้อมูลในฐานข้อมูลถึงปริมาณฟลาโวนอยด์ในอาหาร ในปี 2013 พบว่าอาหารที่เป็นแหล่งของฟลาโวนอยด์ ได้แก่ รากชะเอม เคเปอร์ หัวหอม ผลเบอร์รี่ ชิง ไบยี่หระ คะน้า แพงพวย กระเจี๊ยบ พริกไทย ผักชีฝรั่ง หัวผักกาด เมล็ดเชีย และถั่วบางชนิด เส้นโซบะ บล็อกโคลี่ ในส่วนของสารประกอบฟลาโวนอยด์พบมากใน ข้าวฟ่าง เครื่องเทศ และสมุนไพรบางชนิด เช่น ออริกาน สะระแหน่ เมล็ดผักชีฝรั่ง ผักชีฝรั่งแห้ง ลูกเบอร์รี่ ต้นสน พริกไทย อาหารที่อุดมไปด้วยฟลาโวนอยด์ ได้แก่ เปลือกแอปเปิ้ล กลัวย เบอร์รี่บางชนิด ไวน์แดง ชาดำ ชาเขียว ชาขาว องุ่นดำ พีช พลัม ถั่วปากอ้า ถั่วพีแคน ส่วนฟลาโวนอยด์พบได้ในผลไม้ตระกูลส้มและแหล่งอาหารที่พบปริมาณแอนโทไซยานินสูง ได้แก่ เบอร์รี่อ่อน ไวน์แดง เซอร์รี่ เคอร์แรนท์ ลูกพลัม อะเชโรลา กะหล่ำปลีแดง มะเขือยาว หอม หัวแดง หัวไชเท้า ถั่วพีแคน ถั่วพิสตาเซีย ถั่วดำ ถั่วแดง และข้าวสาลีสีม่วง แม้ว่าสารประกอบฟีนอลิกในอาหารจะมีประโยชน์ต่อสุขภาพ แต่อย่างไรก็ตามนั้น สารประกอบฟีนอลิกยังมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสมบัติทางประสาทสัมผัสและคุณภาพด้านโภชนาการของอาหาร ได้แก่ เกิดการปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยเอนไซม์ของสารประกอบฟีนอลิก การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของโพลีฟีนอลออกซิเดสซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสีของอาหาร เกิดการสูญเสียกลิ่น รส และคุณค่าทางอาหาร ตัวอย่างเช่น โพลีฟีนอลออกซิเดสมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในองุ่นการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลสามารถป้องกันได้โดยการใช้สารช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ซึ่งในทางอุตสาหกรรมมักนิยมใช้สารประเภทซัลไฟต์ แต่สารประเภทซัลไฟต์นั้นมีผลเสียที่เสี่ยงต่อสุขภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อย่างระมัดระวังโดยใช้ในปริมาณที่องค์การอาหารและยาคำหนด (Ho, 1992; Oliverir *et al.*, 2014)

2.1.3 การแปรรูปผักข้าวในปัจจุบัน

ผักข้าวถือเป็นพืชที่มีสรรพคุณทางยาชนิดหนึ่ง ในประเทศเวียดนามได้มีการนำเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวมาใช้ช่วยบรรเทาอาการตาแห้งและช่วยบำรุงสายตา นอกจากนี้ยังนิยมนำเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวมาหุงร่วมกับข้าวเพื่อใช้รับประทานในงานพิธีมงคลต่างๆ เช่น งานแต่งงาน งานขึ้นปีใหม่ เป็นต้น ในประเทศไทยก็ได้มีการนำเนื้อผลผักข้าวอ่อนมาบริโภค โดยนิยมนำมาบริโภคร่วมกับน้ำพริกหรือนำมาใช้เป็นส่วนประกอบประเภทแกง แต่ผักข้าวสดนั้นมีข้อจำกัดคือมีอายุการเก็บสั้นจึงมีการนำผักข้าวมาแปรรูป การแปรรูปผักข้าวนี้สามารถทำได้หลายวิธี ประกอบด้วย การทำแห้งผักข้าว การสกัดน้ำมันจากผักข้าว การเอนแคปซูลเลชัน หรือการนำไปเป็นส่วนผสมร่วมกับอาหารแปรรูปชนิดอื่น เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปผักข้าวมีหลายประเภท ประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์ประเภทไขมัน (மாகารีน น้ำมัน ไขมัน เนย) เครื่องดื่ม น้ำผลไม้ อาหารเหลวประเภทซูป ไซรัป ลูกกวาด พาสต้า ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และอื่นๆ (Kubola and Siriamornpun, 2011; Kha *et al.*, 2013)

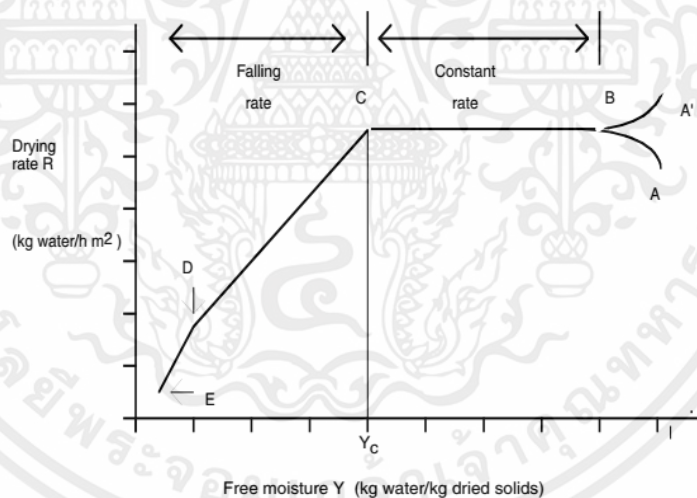
2.2 การทำแห้ง

การถนอมอาหารโดยวิธีการทำแห้งเป็นวิธีที่ใช้กันมาเป็นเวลานาน การทำแห้งผลไม้เป็นกระบวนการที่รู้จักกันดีในสมัยประวัติศาสตร์ ชาวเปอร์เซียและชาวจีนได้มีการทำแห้งผักและผลไม้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานานกว่า 5,000 ปี นอกจากการใช้วิธีการทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แล้วก็ได้มีการเริ่มพัฒนาเทคนิคการทำแห้งแบบอื่นๆขึ้นมาในช่วงจุดเริ่มต้นของศตวรรษที่ 20 โดยการใช้เครื่องอบเข้ามาช่วยในการทำแห้ง เนื่องจากการทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีการทำแห้งวิธีธรรมชาติ ไม่สามารถควบคุมสภาวะในการทำแห้งได้

มีการบันทึกเกี่ยวกับการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งเป็นครั้งแรกในศตวรรษที่ 18 ซึ่งเป็นการทำแห้งผักโดยใช้เตาร้อน หลังจากนั้นเริ่มมีการพัฒนาเทคโนโลยีการทำแห้งในช่วงระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 และสงครามโลกครั้งที่ 2 เริ่มมีการศึกษาการทำแห้งแบบสุญญากาศในอาหารหลายประเภทในช่วงระหว่างยุคสงครามโลกครั้งที่ 1 วิธีการทำแห้งแบบอื่นๆได้มีการเริ่มศึกษาและพัฒนาขึ้นในช่วงเวลา ก่อนที่จะเกิดสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการใช้การทำแห้งแบบลูกกลิ้งในการทำแห้งเวย์และบัตเตอร์มิลค์ ชุปและมะเขือเทศผง ใช้การทำแห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตผลิตภัณฑ์นมและไข่ และในปี 1960 ได้เริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเกิดขึ้นมากขึ้น และเนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคในด้านคุณภาพและความต้องการประหยัดพลังงานในกระบวนการทำแห้ง รวมทั้งการศึกษาที่เกิดขึ้นมากมายเป็นแรงผลักดันให้นักวิทยาศาสตร์และกลุ่มสังคมอุตสาหกรรมมีความก้าวหน้าในด้านเทคโนโลยีการทำแห้ง (Ratti and Araya-Farias, 2009)

2.2.1 หลักการทำแห้ง

การทำแห้ง คือ การระเหยเอาความชื้นออกจากวัสดุ ในกระบวนการทำแห้ง น้ำหนักของวัสดุจะมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำแห้งเพิ่มขึ้น เรียกว่าอัตราการทำแห้ง หรืออธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา กราฟอัตราการทำแห้งแบ่งได้เป็น 2 ช่วงหลักๆ ประกอบด้วย ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่และ ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (Barbosa-Cánovas, 2002) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟอัตราการทำแห้ง

ที่มา : Barbosa-Cánovas., 2002

จากรูปที่ 2.8 จุด A และ A' แสดงถึงจุดที่วัสดุเย็นและวัสดุร้อน ตามลำดับ จุด B แสดงถึงจุดที่บริเวณผิวหน้าวัสดุมีอุณหภูมิเข้าสู่สมดุล โดยช่วงจุด B ถึงจุด C เรียกว่า ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ เป็นการระเหยวอเตอร์แอคทีฟที่ออกจากผิวหน้าวัสดุ ซึ่งในเริ่มแรก ที่ผิวหน้าวัสดุมีปริมาณความชื้นสูงมาก หลังจากความชื้นที่ผิววัสดุเริ่มระเหยออกไปแล้วจากนั้น น้ำที่อยู่ใกล้ผิวหน้าวัสดุจะเคลื่อนที่ระเหยออกไปแทนที่น้ำที่ระเหยไปจากผิววัสดุ โดยที่อุณหภูมิที่ผิวหน้าวัสดุมีค่าใกล้เคียงกับ

อุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ มีสมการการถ่ายเทความร้อนและมวลดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

$$Q = hA (T - T_w) \quad (2.1)$$

$$N_a = K_y (X_w - X) \quad (2.2)$$

เมื่อ

Q = ปริมาณความร้อน
 h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
 A = พื้นที่ในการทำแห้ง
 T = อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง
 T_w = อุณหภูมิกระเปาะเปียก
 N_a = ฟลักซ์ของไอน้ำ
 K_y = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
 X_w = ปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัสดุ
 X = ปริมาณความชื้นของอากาศแห้ง

ส่วนช่วงที่อัตราการทำแห้งลดลงจะเริ่มขึ้นเมื่อ อัตราการทำแห้งมีค่าไม่คงที่เป็นเวลานาน และวอเตอร์แอคทีวิตี ที่ผิวหน้าวัสดุเริ่มลดลง จุด C เป็นจุดที่แสดงถึงการเริ่มเข้าสู่ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นช่วงที่ความชื้นที่ผิวหน้าวัสดุลดลงต่อเนื่องจนกระทั่งแห้ง (จุด D) ในขณะที่ขั้นตอนที่สองของช่วงอัตราการทำแห้งลดลง เริ่มที่จุด D น้ำจะระเหยออกจากภายในวัสดุสู่ผิวหน้าได้น้อยมาก การถ่ายเทมวลสารในช่วงอัตราการทำแห้งลดลงสามารถใช้สมการของ Fick มาช่วยในการอธิบายในสมการ (2.3)

$$\frac{\partial y}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ

y = ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์
 t = เวลาในการทำแห้ง
 x = ระยะทางที่มวลความชื้นถ่ายเท
 D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่

2.2.1.1 ความสัมพันธ์ของไซโครเมตริกต่อการทำแห้ง

1. สมบัติทางอุณหพลศาสตร์และการถ่ายเทระบบน้ำ-อากาศ

ปริมาณความชื้นในวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับสมบัติทางเคมีโดยตรงในเรื่องของแรงขับเคลื่อนมวล (Driving force) ในการถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการทำแห้ง สมบัติระบบน้ำ-

อากาศ หมายถึง สมบัติของอากาศชื้นหรือสมบัติไซโครเมตริกใช้อธิบายถึงการผสมของโมเลกุลน้ำบริสุทธิ์ในเฟสของก๊าซ ในการทำแห้ง อากาศชื้นในสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิการทำแห้งจะมีลักษณะเป็นรูปแบบของก๊าซอุดมคติ (ideal gas) สมการของก๊าซอุดมคติของอากาศและน้ำแสดงดังสมการ (2.4) และสมการ (2.5)

$$P_a V = N_a R T \quad (2.4)$$

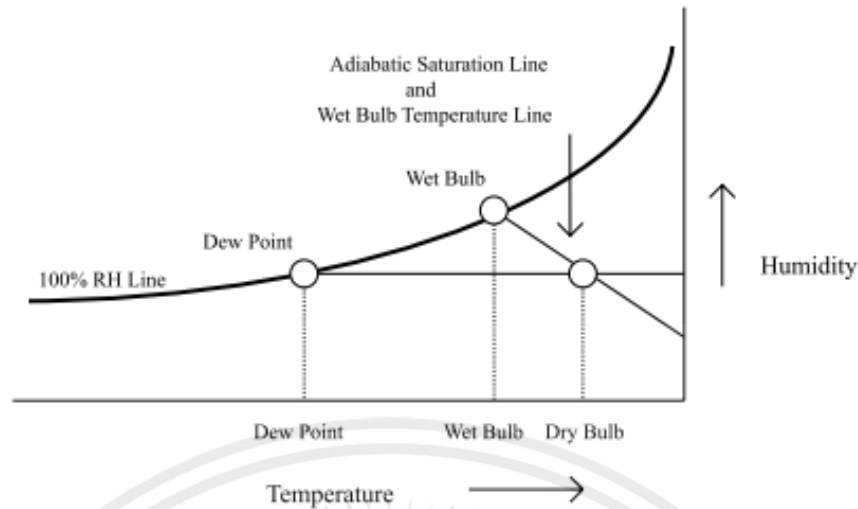
$$P_w V = N_w R T \quad (2.5)$$

เมื่อ P_a และ P_w คือ Partial Pressure ของ อากาศและน้ำ
 n_a และ n_w คือ จำนวนโมลของอากาศและน้ำ
 V คือ ปริมาตรทั้งหมด
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ
 T คือ อุณหภูมิ (K)

2. แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart)

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไซโครเมตริกแสดงในรูปของแผนภูมิไซโครเมตริกเป็นแผนภูมิระหว่างความชื้นสัมบูรณ์กับอุณหภูมิของอากาศ แผนภูมิไซโครเมตริกมีประโยชน์สำหรับการคำนวณสมดุลมวลและพลังงาน เนื่องจากแผนภูมิไซโครเมตริกสามารถแสดงถึงค่าสมบัติของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิหยดน้ำค้าง ความชื้นสัมบูรณ์ ความชื้นสัมพัทธ์และค่าเอนทาลปีได้ อุณหภูมิกระเปาะแห้งคือ อุณหภูมิที่วัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดในระบบอากาศชื้น อุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ อุณหภูมิที่อากาศชื้นเข้าสู่จุดอิ่มตัวที่ความชื้นสัมบูรณ์คงที่ ถ้าให้อากาศชื้นอยู่ในระบบปิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง น้ำในอากาศจะเริ่มเกิดการควบแน่น อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิที่ได้จากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่ห่อหุ้มด้วยสิ่งห่อหุ้มเปียกน้ำ ค่าเอนทาลปีในอากาศชื้นคือผลรวมของค่าเอนทาลปีย่อยขององค์ประกอบอากาศและแสดงถึงปริมาณความร้อนในอากาศชื้น แผนภูมิไซโครเมตริกแสดงดังรูป 2.10 (Ratti and Araya-Farias, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภูมิไซโครเมตริก
ที่มา Vega-Mercado *et al.*, 2001

3. ความชื้นและความชื้นสมมูล

ตามธรรมชาติแล้วผลผลิตทางการเกษตรทุกชนิดมีความชื้นเป็นองค์ประกอบ การแสดงค่าปริมาณความชื้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ ความชื้นฐานเปียกและความชื้นฐานแห้ง ร้อยละความชื้นและอัตราส่วนความชื้น การใช้การวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกมักใช้ในอุตสาหกรรมธัญพืช อย่างไรก็ตามการใช้การวัดความชื้นฐานเปียกมีข้อเสีย คือ ปริมาณความชื้นฐานเปียกสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หากมีการระเหยน้ำออก ในทางกลับกันปริมาณความชื้นที่แสดงอยู่ในรูปของปริมาณความชื้นฐานแห้งนั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ การกำหนดปริมาณความชื้นฐานแห้งจะมีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นฐานเปียกเสมอ สามารถสังเกตได้จากสมการ ที่ 2.6 และ 2.7

$$m = \frac{m_w}{m_w + m_d} = \frac{m_w}{m_t} \quad (2.6)$$

$$M = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.7)$$

เมื่อ m = ความชื้นมาตรฐานเปียก

M = ความชื้นมาตรฐานแห้ง

m_w = มวลของความชื้น

m_d = มวลของวัสดุแห้ง

m_t = มวลรวมของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่เก็บไว้เป็นเวลานานที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่จะทำให้ปริมาณความชื้นเข้าสู่ภาวะสมดุล การเข้าสู่ภาวะความชื้นสมดุลหมายถึงสภาวะที่ไม่มีการถ่ายเทมวลความชื้นระหว่างวัสดุและอากาศ ความชื้นสมดุลสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ กราฟที่สร้างจากสมการมีความเหมาะสมการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ไม่มีสมการใดที่เหมาะสมในการใช้อธิบายได้อย่างครอบคลุมทุกผลิตภัณฑ์ สมการที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลมี 4 สมการ ได้แก่ สมการของ Halsey และ สมการของ Henderson โดยมีการดัดแปลงจากสมการเดิมอีก 2 สมการ (Wilhelm *et al.*, 2005) ดังนี้

สมการ Halsey

$$ERH = \exp\left(\frac{-K}{M_e^N}\right) \quad (2.8)$$

สมการ Modified Halsey

$$ERH = \exp\left[\exp\left(\frac{K + C t}{M_e^N}\right)\right] \quad (2.9)$$

สมการ Henderson

$$ERH = 1 - \exp(-K t M_e^N) \quad (2.10)$$

สมการ Modified Henderson

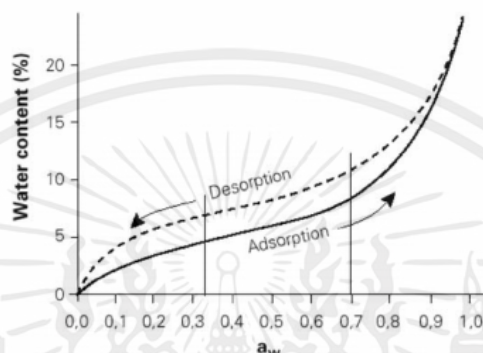
$$ERH = 1 - \exp(-K(t + C)M_e^N) \quad (2.11)$$

เมื่อ ERH คือ ความชื้นสัมพัทธ์
 M_e = ปริมาณความชื้นสมดุล
 t คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
 K, C, N คือ ค่าคงที่เฉพาะแต่ละวัสดุ

4. วอเตอร์แอกทิวิตี้

ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้คือ ค่าที่แสดงบ่งบอกถึงปริมาณน้ำในอาหารที่สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเอนไซม์ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้สามารถนิยามได้คือเป็นอัตราส่วนของความดันไอของวัสดุต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้มีค่าเท่ากับความสัมพันธ์สมดุล (Equilibrium relative humidity-ERH) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สมดุลแสดงอยู่ในรูปเศษส่วนต่อ 100 ส่วน (Bhandari and Adhikari, 2008)

ความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้กับความชื้นวัสดุ เรียกว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Sorption isotherm) โดยเส้นกราฟส่วนโค้งของไอโซเทิร์มการดูดซับเกิดจากการพลอตค่าปริมาณความชื้นในวัสดุกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้หรือค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล โค้งของไอโซเทิร์มการดูดซับแบ่งได้เป็นสองกรณี คือ adsorption (วอเตอร์แอกทิวิตี้เริ่มจากประมาณ 0.0) และ desorption (วอเตอร์แอกทิวิตี้เริ่มจากประมาณ 1.0) ดังรูป 2.11 โดยเส้นโค้งของ adsorption เป็นกระบวนการเพิ่มความชื้น ในขณะที่เส้นโค้ง desorption คือกระบวนการคายความชื้น



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้กับความชื้นวัสดุ
ที่มา : Bhandari and Adhikari, 2008

2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแห้งอาหาร

ผักและผลไม้จำเป็นต้องมีการทำแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพื่อความสะอาดในการขนส่ง การถนอมอาหารประเภทผักและผลไม้ด้วยวิธีการทำแห้ง มีพื้นฐานมาจากการทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำและผลิตภัณฑ์อาจมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนข้ามจากจุลินทรีย์ก่อโรค การใช้พลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำแห้ง ระบบการทำแห้งที่เหมาะสม คือ การทำให้ประหยัดต้นทุน เช่น การใช้เวลาในการทำแห้งให้น้อยที่สุด และการทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ให้น้อยที่สุด การทำแห้งผักผลไม้มีหลากหลายรูปแบบ (Sagar and Kumar, 2010) ดังนี้

2.2.2.1 การทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 300 MHz ถึง 300 GHz โดยทั่วไปมักใช้ที่ความถี่ 915 MHz - 2,450 MHz ในการทำแห้ง การให้ความร้อนจากไมโครเวฟเกิดจากการชนและเสียดสีกันระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับโมเลกุลที่มีขั้วในวัสดุหรืออาหาร โดยคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้นมีการชนและเปลี่ยนแปลงทิศทางกว่าหนึ่งล้านครั้งต่อวินาที การใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำแห้งเป็นการที่ใช้พลังงานที่ต่ำพอสมควร การทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟมีความแตกต่างจากการทำแห้งโดยตู้อบลมร้อนคือ การทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนนั้นจะระเหยน้ำที่ผิวหน้าวัสดุก่อน ในขณะที่ผิวหน้าวัสดุนั้นแห้งแล้วทำให้การถ่ายเทความชื้นจากชั้นในชั้นวัสดุนั้นเป็นไปได้ยากขึ้น แต่การทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟนั้นสามารถส่งความร้อนทะลุผิวหน้าแห้งแล้วได้ดีกว่าการทำแห้งแบบลมร้อน แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้กระบวนการทำแห้งเสร็จได้โดยสมบูรณ์ ต้อง

อาศัยเทคนิคอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การใช้ลมร้อน หรือการใช้ระบบสุญญากาศ (Sagar and Kumar, 2010; Nijhuis *et al.*, 1998)

2.2.2.2 การทำแห้งแบบออสโมซิส

การทำแห้งแบบออสโมซิสเป็นวิธีหนึ่งในการลดปริมาณความชื้นอาหารโดยการออสโมติส สารละลายเข้าไปในอาหาร มักใช้ในการลดปริมาณความชื้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ เนื่องจากเซลล์ของผักผลไม้มีลักษณะเป็นเยื่อเลือกผ่าน น้ำในอาหารจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ได้ไว กว่าน้ำตาลในอาหาร น้ำจึงเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ก่อนจากนั้นสารละลายออสโมซิสจึงเคลื่อนที่สู่เซลล์ ผักผลไม้ การทำแห้งแบบออสโมซิสเป็นกระบวนการทำแห้งที่ใช้พลังงานต่ำ ลดการใช้ปริมาณและ เวลาการให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากวัสดุ แต่อย่างไรก็ตาม การทำแห้งด้วยวิธีการออสโมซิส เพียงขั้นตอนเดียวไม่สามารถทำแห้งวัสดุได้อย่างสมบูรณ์จึงต้องมีการทำแห้งร่วมกับวิธีการทำแห้งด้วย วิธีอื่นๆ เนื่องจากการทำแห้งแบบออสโมซิสเป็นการลดวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ เพียงบางส่วนเท่านั้น ตัวแปรที่มีผลต่อการทำแห้งแบบออสโมติส ได้แก่ ความอ่อนแก่ของผักผลไม้ สายพันธุ์ อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้นของสารละลายออสโมซิส รูปร่างของวัสดุ อัตราส่วนของชิ้น ไม้ต่อสารละลาย โดยจลนศาสตร์การทำแห้งแบบออสโมติสนิยามได้จากอัตราการถ่ายเทมวลของ น้ำในผลไม้ในวัสดุซึ่งในช่วงแรกจะเกิดอัตราการถ่ายเทที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนระหว่าง วัสดุและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติสสูง (Chavan, 2012; Sagar and Kumar, 2010)

2.2.2.3 การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การทำแห้งแบบแช่เยือก ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาการสูญเสียสารประกอบและกลิ่นรส ในอาหารซึ่งเกิดได้ง่ายหากอาหารสัมผัสกับความชื้น การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย 1) การแช่เยือกแข็งวัสดุ และ 2) การทำแห้งวัสดุ ในการแช่เยือกแข็งวัสดุ ต้องทำการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เพื่อให้อนุภาคน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในวัสดุมีขนาดเล็ก เนื่องจากขนาด น้ำแข็งมีผลต่อความเสียหายต่อโครงสร้างเซลล์วัสดุ จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนการทำแห้ง โดยการลด ความดันบรรยากาศให้ต่ำกว่าจุดรวมสาม ผลึกน้ำแข็งจะเกิดการระเหิดออกไปด้วยพลังงานจากความ ร้อนแฝงเป็นการกำจัดวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ออกจากวัสดุ แต่ในวัสดุยังคงเหลือความชื้นที่ไม่สามารถ ระเหิดออกไปได้ เมื่อความร้อนแฝงหมดไปตัววัสดุจึงเกิดความร้อนขึ้น ในระหว่างนี้ต้องไม่ให้ความสูง จนเกินไป (ไม่เกิน 30-50°C) เพื่อไม่ให้วัสดุเกิดการสูญเสียสมบัติทางเคมีกายภาพ ประโยชน์หลักของ การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งคือ วัสดุสามารถคงสภาพเดิมได้มากเมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบอื่น สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารได้สูง แต่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างสูง (Barbosa-Cánova and Vega-Mercado, 1996; Ratti, 2009)

2.2.2.4 การทำแห้งแบบพ่นฝอย

การทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีที่รู้จักกันดีในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารผง วัตถุประสงค์ ของการทำแห้งประเภทนี้ คือ การกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็วเพื่อให้มีผลเสียต่อ ผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด การทำแห้งแบบพ่นฝอยมีประสิทธิภาพในการทำให้อาหารของเหลวที่มีอนุภาค แขนวลอยเจือปนให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ผงแห้ง ขั้นตอนการทำแห้งแบบพ่นฝอยประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน 1) การทำให้อาหารของเหลวอยู่ในรูปของละอองฝอยโดยการใช้หัวฉีด โดยรูปแบบขนาดของหัวฉีดที่ นิยมใช้ได้แก่หัวฉีดประเภท Pneumatic two fluid, pressure nozzle และ cone nozzle 2) การ สัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างอนุภาคของเหลวและลมร้อน 3) การระเหยของน้ำ 4) การแยก

อนุภาคผงออกจากกระแสมร้อน การทำแห้งประเภทนี้มีข้อจำกัดคือ วัสดุที่นำมาทำแห้งต้องอยู่ในรูปของของเหลวที่สามารถฉีดพ่นได้ (Sagar and Kumar, 2010)

2.2.2.5 การทำแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) มีความแตกต่างจากการทำแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ (Sun drying) คือ มีการใช้อุปกรณ์ในการกักเก็บรังสีแสงอาทิตย์และมีการควบคุมพลังงานรังสีความร้อนในการทำแห้ง ข้อได้เปรียบของการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับการทำแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ คือสามารถทำแห้งได้เร็วกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่า มีความยืดหยุ่นในการทำงานมากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ดีกว่า การใช้ระยะเวลาการทำแห้งที่รวดเร็วกว่าทำให้ลดปัญหาการเสื่อมเสียของวัตถุดิบหลังการเก็บเกี่ยวลงได้ มีความสะอาดถูกสุขลักษณะลดการปนเปื้อนข้ามจากสัตว์พาหะต่าง ๆ การควบคุมอุณหภูมิการทำแห้งและเวลาที่ใช้ในการทำแห้งทำให้เหมาะสมได้ทำให้ลดการสูญเสียสารคุณค่าประโยชน์ในวัตถุดิบ เช่น วิตามินซี ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและรสชาติน้อย อีกทั้งยังมีค่าการดำเนินการต่ำ เครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือแบบ active และแบบ passive เครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบ passive คือการอาศัยเพียงทิศทางลมตามธรรมชาติ ก่อสร้างเครื่องทำแห้งได้ง่าย ใช้วัสดุราคาถูกและหาได้ง่าย เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบไปด้วย ตู้อบแห้งด้านบนปิดคลุมด้วยวัสดุแก้วหรือพลาสติกโปร่งใส มีช่องสำหรับทางเข้าออกของอากาศ วัสดุอาหารที่ต้องการทำแห้งจะถูกวางบนถาดที่มีกระแสมร้อนไหลผ่าน ส่วนเครื่องอบแห้งอีกประเภทหนึ่งคือแบบ active จะมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์เข้ามาได้แก่ พัดลมหรือปั๊มลม เพื่อใช้ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของลมร้อน (Chua and Chou, 2003)

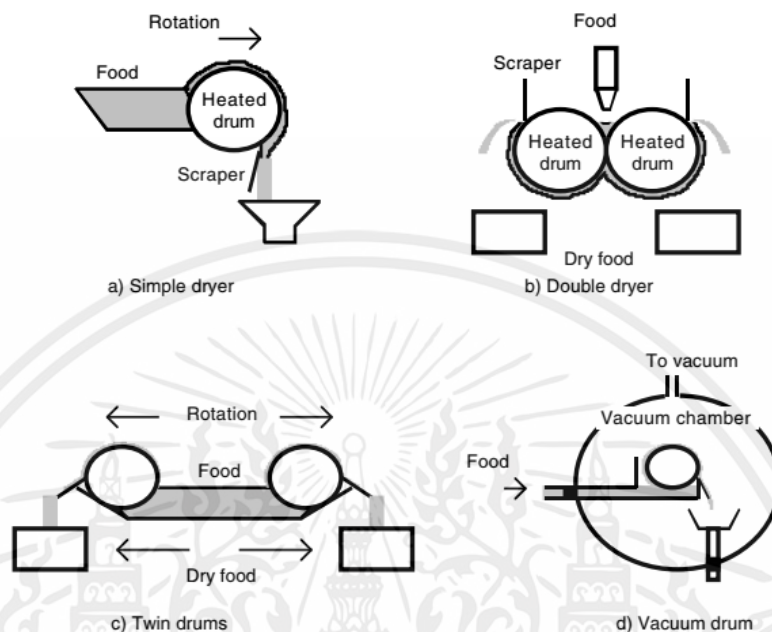
2.2.2.6 การทำแห้งแบบโฝม

การทำแห้งแบบโฝมเมทคือการนำวัตถุดิบมาทำให้อยู่ในรูปแบบโฝมก่อนนำไปทำแห้งด้วยลมร้อน เริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในรูปของของเหลว จากนั้นนำไปทำให้เป็นโฝมโดยการเติมอากาศหรือก๊าซอื่น ๆ และมีการเติมสารที่ช่วยให้เกิดโฝม จากนั้นนำไปเทใส่ถาดบางก่อนนำไปทำแห้งด้วยลมร้อน การเกิดโฝมแบบโฝมทำให้น้ำสามารถระเหยได้ง่ายและรวดเร็ว ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อความสามารถในการเกิดโฝมและความคงตัวของโฝมมีหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณของแข็งในวัตถุดิบที่ต้องการทำแห้ง อุณหภูมิระหว่างการเกิดโฝม เวลาที่ใช้ในการตีโฝม ชนิดและความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฝมและสารที่ช่วยในการเกิดความคงตัวของโฝม (Patel, 1996)

2.2.2.7 การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง มีลักษณะเป็นท่อโลหะกลวงทรงกระบอกที่สามารถหมุนได้ตามแนวอนภายในลูกกลิ้งบรรจุตัวกลางให้ความร้อน โดยมีแหล่งใช้ความร้อนจากไอน้ำร้อน น้ำร้อน หรือตัวกำเนิดความร้อนแบบอื่นๆ การทำแห้งแบบลูกกลิ้งเหมาะสมกับอาหารที่มีลักษณะชั้นหนืด เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ single drum, double drum และ twin drum ปัจจัยสำคัญของการใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง คือความหนาของชั้นฟิล์มอาหารบนผิวลูกกลิ้ง ความเร็วในการหมุนรอบและอุณหภูมิในการให้ความร้อน สิ่งเหล่านี้มีผลต่ออัตราการทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ข้อดีของการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง คือ อัตราการทำแห้งสูง ขั้นตอนกระบวนการในการทำแห้งไม่ซับซ้อน สามารถดำเนินการการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ต้นทุนในการ

ดำเนินการต่ำ แต่มีข้อจำกัด คือ อาหารที่ใช้ในการทำแห้งประเภทนี้ต้องอยู่ในรูปของของเหลวชั้นหนืด (Barbosa-Cánova and Vega-Mercado, 1996)



รูปที่ 2.12 ประเภทของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง a) Simple drum b) Double drum c) Twin drum และ d) การประยุกต์เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งโดยเพิ่มระบบสุญญากาศ

ที่มา : Barbosa-Cánova and Vega-Mercado, 1996

2.2.3 การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

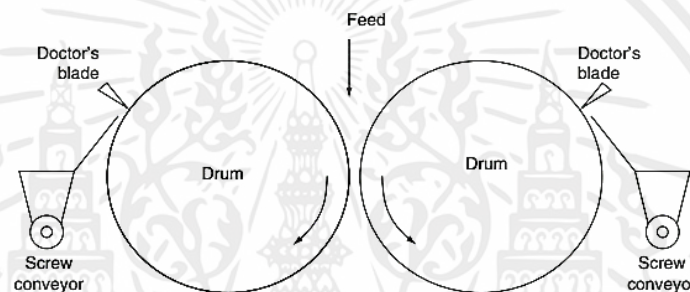
เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งถูกพัฒนาขึ้นในช่วงต้นทศวรรษที่ 1990 ปัจจุบันในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมาใช้กับอาหารหลายประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์นม อาหารเด็ก อาหารเข้าซีเรียล เนื้อผักและผลไม้ แป้งทำอาหารและสเปนต์ยีสต์ลักษณะการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง คือการนำของเหลวมาแผยให้เป็นแผ่นฟิล์มบางบนลูกกลิ้งที่กำลังหมุนซึ่งภายในลูกกลิ้งมีแหล่งตัวกลางให้ความร้อนบรรจุอยู่ เมื่อลูกกลิ้งหมุนครบรอบ แผ่นอาหารที่ถูกทำแห้งจะถูกชูดออกด้วยใบมีดเป็นลักษณะเป็นแผ่นหรือเป็นผง การทำแห้งเป็นการทำแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง (ประสิทธิภาพ 60-90%) กำลังการผลิตอยู่ที่ $5 \text{ kg hr}^{-1}\text{m}^{-2}$ ถึง $50 \text{ kg hr}^{-1} \text{m}^{-2}$ ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ปริมาณความชื้นเริ่มต้นและปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์และสภาพแวดล้อมในการทำแห้ง ข้อได้เปรียบของการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนเนื่องจากการระเหยน้ำอย่างจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาในการทำแห้งสั้น สามารถใช้ทำแห้งอาหารที่มีความหนืดหลายประเภท อีกทั้งเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งยังสามารถทำความสะอาดได้ง่าย และมีลักษณะที่ถูกต้องลักษณะ ง่ายต่อการดำเนินการและการซ่อมบำรุงรักษา อย่างไรก็ตาม การทำแห้งแบบลูกกลิ้งอาจมีปัญหาในการทำแห้งวัตถุดิบบางประเภท เช่น วัตถุที่แผ่กระจายตัวเป็นฟิล์มได้ยากหรือวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำตาลสูงทำให้ยากต่อการทำแห้งและการชูดออกด้วยมีด ค่าใช้จ่ายในเปลี่ยนอุปกรณ์สูง การทำแห้งประเภทนี้อาจส่งผลต่อกลิ่นรสและสีของผลิตภัณฑ์เนื่องจากการสัมผัสกับความร้อนที่สูง

นอกจากนี้การทำแห้งแบบลูกกลิ้งยังไม่เหมาะกับการทำแห้งวัตถุดิบที่มีปริมาณเกลือสูงหรือวัตถุดิบที่มีส่วนผสมของสารที่มีความสามารถในการกักต่อน้ำเนื่องจากจะทำให้เกิดการกักต่อน้ำผิวลูกกลิ้งเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรง (Tang *et al.*, 2003; Ramli and Daud, 2006)

2.2.3.1 ประเภทของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

1. Atmospheric double drum dryer

เครื่องทำแห้งประเภทนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งจำนวน 2 ลูกกลิ้ง มีอัตราการผลิตที่สูงสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ อาหารเหลวจะถูกป้อนผ่านอุปกรณ์สู่ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งซึ่งหมุนในทิศทางสวนเข้าหากัน อาหารเหลวจะเกิดการแผ่กระจายตัวเป็นแผ่นฟิล์มบางบนลูกกลิ้งคู่ทั้งสองและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวลูกกลิ้ง

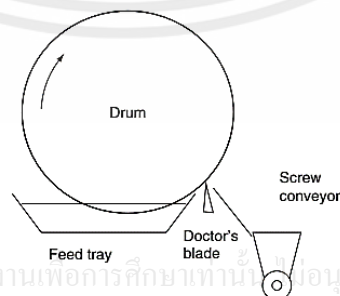


รูปที่ 2.13 เครื่องทำแห้งแบบ Atmospheric double drum dryer

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

2. Atmospheric single drum dryer

หลักการการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งประเภท Atmospheric single drum dryer หรือเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเดี่ยว เริ่มจากการป้อนอาหารเหลวผ่านหัวฉีดแบบต่างๆให้ผ่านระหว่างระหว่างลูกกลิ้งกับลูกโม่หรือการจุ่มลูกกลิ้งผ่านถาดบรรจุของเหลวและเกิดการกระจายตัวเป็นแผ่นฟิล์มบางบนผิวลูกกลิ้งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.14 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งประเภท Atmospheric single drum dryer

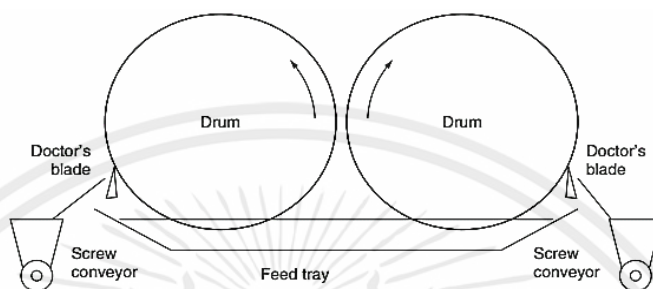
ที่มา : Ramli and Daud, 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Atmospheric twin drum dryer

สำหรับเครื่องทำแบบลูกกลิ้งประเภท Atmospheric twin drum dryer ประกอบด้วย ลูกกลิ้งจำนวน 2 ลูกกลิ้ง มีความแตกต่างจาก เครื่องแห้งแบบลูกกลิ้งประเภท Atmospheric double drum dryer คือ อาหารเหลวจะถูกจุ่มจากก้นด้านลูกกลิ้งหรือถูกฟุ้งขึ้นมาจากด้านล่าง โดยที่ลูกกลิ้งจะหมุนไปในลักษณะหมุนออกจากกัน



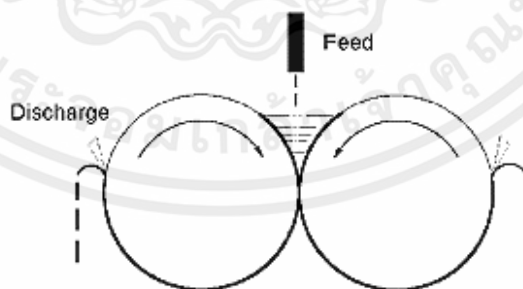
รูปที่ 2.15 เครื่องทำแห้งแบบ Atmospheric twin drum dryer

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

2.2.3.2 การป้อนของเหลวเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

1. Nip feeding

เป็นการป้อนอาหารเหลวเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่มีความเรียบง่าย มักใช้กับเครื่องทำแห้งแบบ Double drum dryer เหมาะกับใช้ในการป้อนอาหารเหลวที่มีความหนืดไม่สูงมากเช่น นมหรือเวย์ การป้อนประเภทนี้มีหลักการคือการป้อนอาหารเหลวผ่านช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง การควบคุมความหนาบางของแผ่นอาหารสามารถทำได้โดยปรับระยะห่างช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.16 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Nip feeding

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

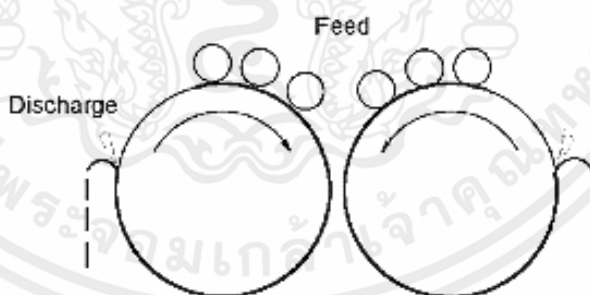
2. Roll feeding

การป้อนอาหารเหลวเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Roll feeding นิยมใช้กับเครื่องทำแห้งแบบ ลูกกลิ้งเดี่ยว มีลูกโม่เป็นอุปกรณ์หลัก อาหารจะถูกป้อนจากด้านบนผ่านช่องว่างระหว่างลูกโม่และ ลูกกลิ้ง นอกจากนี้ลูกโม่ยังสามารถติดตั้งจากด้านล่างเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งได้โดยการจุ่มผ่านภาค อาหารเหลวที่อยู่ด้านล่างของเครื่องทำแห้ง การแยกของแผ่นอาหารเหลวขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของ ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งกับลูกโม่ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งและลูกโม่ และค่า ดัชนีการยกกำลัง ดังสมการ 2.12

$$\frac{T_D}{T_R} = \left(\frac{N_D}{N_R} \times \frac{D_D}{D_R} \right)^{2n(1+2n)} \quad (2.12)$$

- เมื่อ
- T_D คือ ความหนาของแผ่นของอาหารที่อยู่บนลูกกลิ้ง (m)
 - T_R คือ ความหนาของแผ่นของอาหารที่อยู่บนลูกโม่ (m)
 - N_D คือ ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้ง (rpm)
 - N_R คือ ความเร็วในการหมุนของลูกโม่ (rpm)
 - D_D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง (m)
 - D_R คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโม่ (m)

ความหนาของแผ่นอาหารเหลวบนลูกกลิ้งขึ้นอยู่กับความหนืดและแรงตึงผิวของอาหารเหลวและอัตราส่วนของความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งกับลูกโม่ และความกว้างของช่องว่างระหว่าง ลูกกลิ้งละลูกโม่



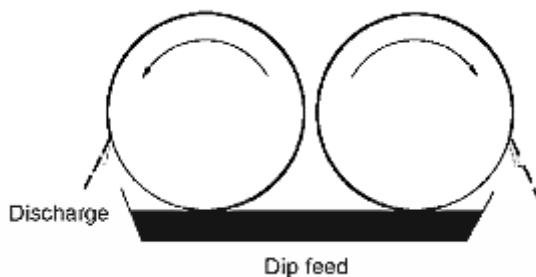
รูปที่ 2.17 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Roll feeding

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

3. Dip Feeding

การป้อนของเหลวเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Dip feeding มีปัจจัยสำคัญ ได้แก่ แรงตึงผิวของช่องเหลว ความหนืด ความหนาแน่น ความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้ง และ มุมองศาที่ใช้ในการจุ่ม ถ้าองศาในการจุ่มมากจะทำให้แผ่นของของเหลวนั้นมีความบาง นอกจากนี้ค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูง

เกินไป ($Re > 1.0$) และความเร็วการหมุนรอบที่สูงมากกว่า 0.5 m/s อาจส่งผลทำให้แผ่นอาหารเหลวเกิดการแยกเป็นเส้นสาย จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งให้มีค่าต่ำ

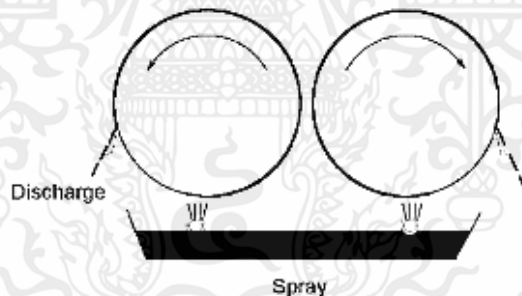


รูปที่ 2.18 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ Dip feeding

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

4. Spray feeding

การป้อนของเหลวเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งโดยใช้หัวฉีดอาหารเหลวให้พ่นกระจายลงบนลูกกลิ้งเรียกว่า Spray feeding วิธีการป้อนประเภทนี้มีประสิทธิภาพเพียง 20-30% ถ้ามียมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอนุภาคที่เกิดจากการฉีดพ่นเกิดจากสะท้อนกลับเมื่อปะทะกับผิวลูกกลิ้งและตกกลับมายังถาดอาหารตามแรงโน้มถ่วงของอนุภาค การป้อนประเภทนี้เหมาะสมกับของเหลวที่มีอัตราการตกตะกอนสูง



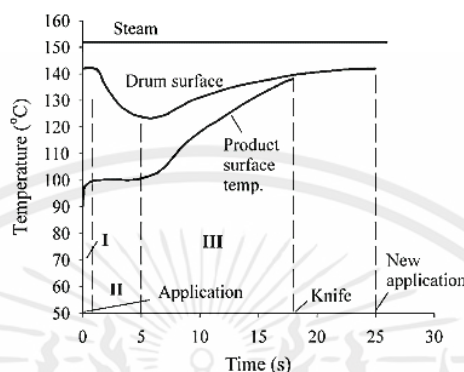
รูปที่ 2.19 การป้อนอาหารเข้าสู่เครื่องทำแห้งแบบ spray feeding

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

2.2.3.3 กลไกการทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

ในการทำแห้งแบบลูกกลิ้งต้องใช้พลังงานความร้อนปริมาณมากในการกระบวนการทำแห้ง โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบลูกกลิ้งมักใช้ไอน้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อนซึ่งควบคุมอยู่ในภายในลูกกลิ้งและถ่ายเทความร้อนไปยังผิวลูกกลิ้ง กลไกของกระบวนการทำแห้งแบบลูกกลิ้งแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรก ได้แก่ ช่วงเริ่มให้ความร้อน หลังจากอาหารเหลวกระจายตัวเป็นแผ่นฟิล์มบางบนลูกกลิ้งร้อน แผ่นอาหารจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเดือดของวอเตอร์ แอคทีวิตี ช่วงที่ 2 ได้แก่ ช่วงที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่ หลังจากอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดือดของน้ำอิสระแล้ว น้ำในผลิตภัณฑ์จะถูกระเหยออกไปในปริมาณมากและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่ ช่วงที่ 3 ได้แก่ ช่วงที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น หลังจากปริมาณอิสระในผลิตภัณฑ์ระเหยไปจน

เกือบหมดอย่างรวดเร็ว ทำให้พลังงานความร้อนที่ผิวลูกกลิ้งมีปริมาณมากเกินไปสำหรับการระเหยน้ำ น้ำที่ใช้สำหรับสร้างพันธะในอาหารจึงเข้ามามีบทบาทในการควบคุมอัตราการระเหย เนื่องจากการระเหยน้ำที่ใช้ในการสร้างพันธะต้องใช้ปริมาณความร้อนที่สูงกว่าการระเหยของเตอร์แอกทิวดี จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นต่อเนื่องไปจนกระทั่งผลิตภัณฑ์ถูกขูดออกจากผิวลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.20 กลไกการทำแห้งของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

ที่มา : Ramli and Daud, 2006

2.2.4 บรรจุภัณฑ์บรรจุผลไม้แห้ง

ผลไม้ที่ผ่านการทำแห้งนั้นมีสมบัติการดูดกลับความชื้นทำให้เกิดการเพิ่มปริมาณความชื้นในตัวผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษาส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเกาะตัวรวมกันเป็นก้อน สูญเสียเนื้อสัมผัสที่ดีและอาจเกิดการเจริญของเชื้อรา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถป้องกันความชื้นแทรกผ่านเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ นอกจากความชื้นแล้วออกซิเจนยังอีกอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพและความปลอดภัยทางอาหาร ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งจึงควรเป็นวัสดุที่สามารถป้องกันการแทรกผ่านทั้งความชื้นและออกซิเจน เช่น แก้ว และโลหะ แต่แก้วและโลหะนั้นมีราคาแพงเมื่อเทียบกับการใช้พลาสติก พลาสติกมีหลายประเภทมีความสามารถในการป้องกันการแทรกซึมของความชื้นและออกซิเจนที่แตกต่างกัน พลาสติกที่ใช้เป็นวัสดุสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารมักอยู่ในรูปแบบของวัสดุหลายชั้น (multilayer materials) ซึ่งมีสมบัติที่สามารถป้องกันแทรกซึมผ่านของออกซิเจน ได้แก่ ethylene vinyl alcohol (EVOH), polyvinyl alcohol (PVOH), nylon 6 (0% RH), nylon MXD6, PET แต่อย่างไรก็ตาม EVOH, PVOH และ nylon 6 ไม่มีสมบัติในการป้องกันการแทรกผ่านความชื้น จึงจำเป็นต้องมีการนำไปใช้ร่วมกับวัสดุที่มีสมบัติในการป้องกันความชื้น ได้แก่ Polyethylene (PE) หรือ Polypropylene (PP) ในรูปแบบของโครงสร้างของวัสดุหลายชั้น (Chonhenchob *et al.*, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 สมบัติของอาหารแห้ง

อาหารผงคืออาหารที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดแบบอนุภาค มีขนาด 50 ถึง 1,000 μm เช่น แป้ง เครื่องเทศ น้ำตาล เครื่องดื่มกึ่งสำเร็จรูป โดยอาหารผงมีสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความสามารถในการไหล มุมทรงตัว การเกาะตัวกันของอาหารแห้ง

2.2.5.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของอนุภาคผง สามารถนิยามได้ว่า เป็นสัดส่วนของมวลรวมต่อปริมาตรทั้งหมด ความหนาแน่นเป็นสมบัติที่สามารถอธิบายถึงสมบัติอนุภาคอาหารผงอื่นๆได้ ได้แก่ โครงสร้างของมวลอาหารผงและขนาดอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาคผงสามารถนิยามได้หลายประเภท ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏและความหนาแน่นจมน้ำ

1. ความหนาแน่นจริง หมายถึง สัดส่วนมวลของอนุภาคต่อปริมาตร ไม่รวมที่ว่างอากาศและช่องว่างในชั้นวัสดุ
2. ความหนาแน่นปรากฏ หมายถึง สัดส่วนของมวลของอนุภาคต่อปริมาตรไม่รวมเฉพาะที่ว่างอากาศ
3. ความหนาแน่นจมน้ำ หมายถึง สัดส่วนของมวลของอนุภาคต่อปริมาตรรวมถึงช่องว่างอากาศและช่องว่างในชั้นวัสดุ

2.2.5.2 มุมทรงตัว

มุมทรงตัวหรือมุมกองเป็นสมบัติทางกายภาพสมบัติหนึ่ง หมายถึง มุมที่เกิดจากการเทวัสดุให้เป็นกองที่คงตัว มุมทรงตัวที่วัดได้เป็นความชันของกองวัสดุที่ทำมุมกับพื้นระนาบในแนวนอน วัสดุที่มีลักษณะเป็น Free flowing powder หรือวัสดุที่เป็นลักษณะแกรนูล เมื่อเทวัสดุให้เป็นกองลักษณะเป็นทรงกรวยคว่ำบนพื้นระนาบจะมีขนาดของมุมทรงตัวน้อย ประมาณ 35° หรือน้อยกว่า 35° ส่วนวัสดุประเภท cohesive powders เป็นวัสดุที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคค่อนข้างสูง จึงมีค่ามุมทรงตัวที่สูงกว่าวัสดุประเภท free flowing powder มีค่ามุมทรงตัวประมาณ 55° หรือมากกว่า 55°

2.2.5.3 ความสามารถในการไหล

การไหลของอนุภาคอาหารผงเป็นการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคจำนวนมากที่สามารถไหลไปกับเหล้ากลุ่มอนุภาคด้วยกันหรือการไหลระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวภาชนะ สมบัติการไหลของอนุภาคผงมีความสำคัญต่อการทำนายการไหลของอนุภาคผงจากถังป้อนวัสดุติบ (hopper) หรือการออกแบบถังกักเก็บวัสดุติบ เครื่องจักรจ่ายสินค้า หรือเครื่องจักรสำหรับกระบวนการบรรจุ

2.2.5.4 การเกาะกันเป็นก้อน

การเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาคอาหารผงเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มักเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ โดยอนุภาคผงจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนเป็นก้อนของแข็งที่มีลักษณะเหนียว การเกิดการเกาะตัวเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ ปฏิกริยาการตกผลึก (Crystallization) การละลายตัวของไขมัน การละลายตัวที่ผิวผลึก การเปียกชื้นจากความชื้น หรือเกิดการแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาค วัสดุที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของตัววัสดุนั้นจะมีสมบัติลักษณะคล้ายแก้ว คือ มีความแข็งและเปราะ มีความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ววัสดุจะเริ่มเข้าสู่สภาวะสถานะคล้ายยาง คือมีลักษณะเหนียว ความหนืดมีค่าลดลงและเกิดการเสียรูปร่าง การวัดค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วสามารถวัดได้โดยเครื่องมือที่

เรียกว่า differential scanning calorimetry (DSC) (Aguilera *et al.*, 1995; Teunou, 1999; Juliano and Barbosa-Canovas, 2010)

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำแห้ง

2.3.1 ลักษณะของเครื่องทำแห้ง

เครื่องทำแห้งมีหลายประเภท เครื่องทำแห้งบางประเภทใช้หลักการการผสมกันระหว่าง กระแสลมร้อนและกระแสวัสดุให้ไหลรวมกัน ทำให้เกิดการทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว ได้แก่ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เครื่องทำแห้งบางประเภท เช่น เครื่องแห้งแบบอุโมงค์ ใช้หลักการกระแสลมไหลผ่าน อุโมงค์ในทิศทางตรงกันข้ามกับวัสดุ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยและเครื่องทำแห้งแบบอุโมงค์นั้นผลิตมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน แต่ในขณะที่เครื่องทำแห้งแบบตู้อบลมร้อนมีเพียงบางส่วนของเครื่องเท่านั้นที่เป็นฉนวน ในส่วนของภาชนะที่วางชิ้นวัสดุนั้นทำด้วยวัสดุโลหะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำแห้ง ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะของเครื่องทำแห้งที่ดีที่สุดนั้นยังต้องขึ้นอยู่กับสภาวะการทำแห้งที่ดีและเหมาะสมสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์นั้นๆด้วย

2.3.2 ปริมาณกระแสลมร้อน

การใช้กระแสลมร้อนในปริมาณมากมีความเหมาะสมสำหรับการทำแห้งที่ใช้ระยะเวลาการทำแห้งสั้น นั่นคือยิ่งใช้ปริมาณลมร้อนมากก็จะใช้เวลาการทำแห้งน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามอาจมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอาจต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วยในการปั๊มลม ได้แก่ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นต้น

2.3.3 อุณหภูมิการทำแห้ง

การใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่สูงจะทำให้เกิดการทำให้แห้งวัสดุอาหารอย่างรวดเร็วแต่การใช้ อุณหภูมิที่สูงนั้นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อสภาพวัสดุอาหารทั้งเชิงเคมีกายภาพและเชิงสุขภาพด้วย

2.3.4 สัดส่วนของอากาศหมุนเวียน

ในบางกรณีหากมีการใช้อากาศหมุนเวียนโดยนำอากาศที่ผ่านการถ่ายเทความร้อนการวัสดุ แล้วนำมาผสมกับอากาศใหม่ อากาศที่ผ่านการถ่ายเทความร้อนให้แก่วัสดุแล้วจะมีปริมาณความชื้นสูงกว่าอากาศใหม่ที่ยังไม่ผ่านการถ่ายเทความร้อนแก่วัสดุ การใช้อากาศใหม่โดยไม่ผสมอากาศหมุนเวียนจึงสามารถถ่ายเทความร้อนแก่วัสดุได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ความร้อนในการทำแห้งแบบอุโมงค์นิยมใช้ลมร้อนจากอากาศหมุนเวียนประมาณ 50-75% ของอากาศที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 อัตราการป้อนวัสดุ

ในการทำแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนหรือการทำแห้งแบบอุโมงค์ สภาพการทำแห้งเชิงอุดมคติคืออากาศที่ผ่านเข้าไปในอุโมงค์หรือตู้อบลมร้อนต้องไม่มีความเย็นและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งสภาวะดังกล่าวสามารถทำได้โดยการลดปริมาณความชื้นของวัสดุที่นำเข้าสู่เครื่องทำแห้ง

2.3.6 ธรรมชาติของวัสดุ

วัสดุทางชีวภาพมีธรรมชาติที่แตกต่างกัน ทั้งองค์ประกอบทางเคมีกายภาพ ปริมาณความชื้นของวัสดุ ความแก่อ่อน ดังนั้นผลของการทำแห้งของวัสดุชีวภาพแต่ละประเภทจึงมีความแตกต่างกัน การทำแห้งเนื้อที่ผ่านการปรุงสุกแล้วจะใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าเนื้อที่ยังไม่ผ่านการปรุงสุก การทำแห้งแครอทที่ระยะอ่อนนั้นใช้เวลาการทำแห้งนานกว่าแครอทที่ระยะแก่ การทำแห้งวัสดุชีวภาพที่มีองค์ประกอบน้ำตาลสูงนั้นสามารถทำได้ยาก หากไม่มีการค้ำนึ่งปริมาณความร้อนที่ใช้ จะไม่สามารถทำแห้งได้อย่างรวดเร็ว ในบางครั้งจึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของวัสดุเพื่อการทำแห้งที่ง่ายขึ้น เช่น การใช้สารช่วยทำแห้ง เป็นต้น (Loesecke, 2005)

2.3.6.1 สารช่วยทำแห้ง

ในกระบวนการทำแห้งน้ำผลไม้มักเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์เกิดการดูดกลับความชื้นและเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์เหนียวติดกับอุปกรณ์การทำแห้งในระหว่างการทำแห้ง ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากองค์ประกอบในผลไม้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยน้ำตาลซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น ฟรักโตส กลูโคส ซูโครส และกรดโออานิก เช่น กรดมาลิก และกรดทาร์ทาลิก (tartaric) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการใช้สารช่วยทำแห้งในกระบวนการทำแห้งผลไม้ ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ตริน กัมอะราบิก เวย์โปรตีน สตาร์ช โปรตีนไข่ เป็นต้น (Jittanit *et al.*, 2011; Bhusari *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2014) สารช่วยทำแห้งที่นิยมใช้ส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกเป็นตามกลุ่มตามประเภทองค์ประกอบ ได้แก่ กลุ่มของคาร์โบไฮเดรต กัม และโปรตีน สารช่วยทำแห้งประเภทคาร์โบไฮเดรตเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่ดีในการละลายและมีความหนืดต่ำแม้มีปริมาณของแข็งสูง แต่อย่างไรก็ตามสารช่วยทำแห้งในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตนั้นขาดสมบัติความสามารถในการลดแรงตึงผิวระหว่างส่วนที่มีขั้วกับไม่มีขั้วในอาหาร ต้องมีการใช้ร่วมกับสารช่วยทำแห้งในกลุ่มของกัมและโปรตีน (Gharsallaoui *et al.*, 2007) สารช่วยทำแห้งที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ตริน กัมโปรตีน

1. มอลโตเด็กซ์ตริน

มอลโตเด็กซ์ตริน เป็นสารช่วยทำแห้งที่ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์และโอลิโกแซคคาไรด์ มอลโตเด็กซ์ตรินเป็นสตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรไลซิสจากกรดหรือเอนไซม์ไฮโดรไลซิส สารช่วยทำแห้งประเภทนี้สามารถแบ่งประเภทตามค่าสมมูลเด็กซ์โทรส (Dextrose Equivalency) หรือค่า DE โดยค่า DE จะสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักมวลโมเลกุล สำหรับมอลโตเด็กซ์ตรินมีค่า DE อยู่ในช่วง 3-20 หากเป็นสตาร์ชที่ผ่านการไฮโดรไลซิสที่มีค่า DE สูงกว่า 20 จะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของ คอร์นไซรัป ค่า DE ที่แตกต่างกันมีผลทำให้มอลโตเด็กซ์ตรินมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกัน เมื่อค่า DE สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าการดูดกลับความชื้น ค่าความสามารถในการละลายสูงขึ้น และทำให้สามารถลดอุณหภูมิจุดเยือกแข็งในผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ในขณะเดียวกัน มอลโตเด็กซ์ตริน ที่มีค่า DE ต่ำ ส่งผลให้มีค่าความหนืด ค่าพลังงานที่ยึดเกาะกันภายในอาหารมากขึ้น

และมีสมบัติในการป้องกันการเกิดการตกผลึกมากขึ้น ในอุตสาหกรรมมีการใช้มอลโตเด็กซ์ตรินกันอย่างแพร่หลาย เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร ใช้เป็นสารปรุงแต่งความหวาน ใช้ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ลดจุดเยือกแข็งในอาหาร ใช้เป็นส่วนประกอบหรือวัตถุเจือปนในอาหาร เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ผู้ผลิตอาหารจึงนิยมนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารผงและที่สำคัญที่สุดคือ มอลโตเด็กซ์ตริน สามารถเพิ่มอุณหภูมิสถานะแก้วในผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้สามารถช่วยลดปัญหาอาหารเกิดการเหนียวติดหรือจับตัวกันเป็นก้อนเมื่อสัมผัสกับความชื้นสูง ซึ่งปัญหานี้มักพบในอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง เช่น น้ำผลไม้ และยังช่วยรักษาสมบัติลักษณะทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chronakis 1998; Gabas *et al.*, 2007; saavedra-Lao and Leyva-Porras, 2015)

2. กัมอะราบิก

เป็นของเหลวที่ขมออกมากจากลำต้นหรือกิ่งก้านของต้นอะคาเซีย ซีเนเกล และอะคาเซีย ซียอล ซึ่งอุดมไปด้วยใยอาหาร กัมอะราบิกมีองค์ประกอบหลัก คือ โพลีแซคคาไรด์และโปรตีนประมาณ 2% ถือว่าจัดเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติอีกชนิดหนึ่ง ในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้กัมอะราบิกเป็นสารให้ความคงตัว สารเพิ่มความข้นหนืด สารอิมัลซิฟลายเออร์และสารหล่อลื่นอนุภาคผง มักใช้ในอุตสาหกรรมประเภทลูกกวาด เบเกอรี่และเครื่องดื่ม องค์ประกอบทางเคมีของกัมอะราบิกขึ้นอยู่กับแหล่งที่ปลูก สภาพอากาศ ฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิต อายุของต้น และกระบวนการผลิต ดังนั้นกัมที่ได้มาจากต้นอะคาเซีย ซีเนเกล และอะคาเซีย ซียอล จึงมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน กัมทั้ง 2 ประเภทนี้ประกอบด้วยน้ำตาลรีดิคซ์เหมือนกัน แต่กัมจากอะคาเซีย ซีเนเกลมีปริมาณน้ำตาลแรมโนสและกรดกรดกลูคูโรนิกน้อยกว่า แต่มีปริมาณน้ำตาลอะราบิโนสและกรด 4-โอ-เมทิล กลูคูโรนิก มากกว่ากัมที่ได้มาจากต้นอะคาเซีย ซียอล (Gharsallaoui, 2007)

3. เวย์โปรตีน

เวย์โปรตีนเป็นองค์ประกอบที่แยกได้จากนม องค์ประกอบทางชีวภาพในเวย์โปรตีนประกอบด้วยแล็กโทเฟอริน บีตา-แล็กโทโกลบูลิน โกลโคมาโครเปปไทด์ แอลฟา-แล็คตัลบูมิน และอิมมิวโนโกลบูลิน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการมีสมบัติการเสริมสร้างภูมิคุ้มกันที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย ในปัจจุบันเวย์โปรตีนนิยมถูกนำมาใช้เป็นอาหารเสริมเพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับกล้ามเนื้อ การจำแนกเวย์โปรตีนสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภทโดยที่ใช้ปริมาณขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เวย์โปรตีนเป็นเกณฑ์ในการจำแนก ได้แก่ เวย์โปรตีนไอโซเลต เวย์โปรตีนคอนเซนเตรท เวย์โปรตีนไฮโดรไลซ์ และอันดีเนเจอร์เวย์คอนเซนเตรท เวย์โปรตีนมีสมบัติเป็นอิมัลซิฟลายเออร์ที่ดี มีบทบาทสำคัญในการป้องกันการสูญเสียสารคุณค่าประโยชน์จากความร้อนจึงนิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยทำแห้งในกระบวนการทำแห้งอาหารต่างๆ เช่น ผัก ผลไม้ น้ำผึ้ง เป็นต้น (Bazaria and Kumar, 2016; Shi *et al.*, 2013; Bhusari and Kumar, 2014; Marshall, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

วิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) ประกอบด้วยกลุ่มของเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติ สามารถนำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระว่ามีผลด้วยตัวแปรนั้นๆเองหรือมีผลเมื่อมีตัวแปรอื่นร่วมด้วยอย่างน้อยเพียงใดและสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปสร้างกราฟอธิบายความสัมพันธ์ ค่าตอบสนองเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็นสมการที่ (2.13)

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2.13)$$

เมื่อ η คือ ค่าตอบสนอง
 x_1, x_2, \dots, x_n คือ ตัวแปรอิสระ
 n คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ
 ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดตัวแปรอิสระและระดับของตัวแปรอิสระ ขั้นตอนที่สองคือการเลือกแผนการทดลองและสร้างโมเดลทำนายค่าตอบสนองและขั้นตอนสุดท้ายคือการสร้างกราฟอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบและตัวแปรอิสระ ได้แก่ กราฟพื้นผิวตอบสนอง (response surface plot) และ กราฟเส้นโครงร่าง (contour plot)

ในกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางชีวเคมีนั้นมีปัจจัยจำนวนมากที่ส่งผลต่อกระบวนการ ในการทดลองนั้นเราไม่สามารถทำการทดลองถึงผลกระทบของปัจจัยทุกปัจจัยได้ จึงจำเป็นต้องมีการคัดเลือกตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุด ในกรณีที่หน่วยการวัดของตัวแปรอิสระมีหน่วยที่ไม่เหมือนกัน จึงไม่สามารถทำการวิเคราะห์แบบถดถอยได้ (the regression analysis) จึงจำเป็นต้องมีการแปลรหัสให้อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 (normalize the parameter) สมการการคำนวณรหัสตัวแปรอิสระเป็นไปตามสมการที่ (2.14)

$$X = x - \frac{[x_{max} + x_{min}]/2}{[x_{max} - x_{min}]/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ X คือ รหัสของตัวแปร
 x คือ ค่าตัวแปรธรรมชาติของตัวแปรอิสระ
 x_{max} คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระที่ศึกษา
 x_{min} คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระที่ศึกษา

แบบจำลองที่มีรูปแบบอยู่ในรูปอย่างง่ายที่สุดของขั้นตอนการสร้างสมการ คือ สมการที่อยู่ในรูปฟังก์ชันแบบเส้นตรง ดังสมการที่ (2.15) ดังนั้นเส้นกราฟที่ได้จากแบบจำลองนี้จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถเลือกใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองปัจจัยได้แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้

อธิบายเพิ่มเติมถึง second order effect หรือการอธิบายถึงผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย ซึ่งมีแบบจำลองเป็นไปตามสมการที่ (2.16)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.15)$$

เมื่อ β_0 คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่
 β_i คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้น
 x_i คือ ตัวแปรอิสระ
 ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.16)$$

เมื่อ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์เทอมการมีผลกระทบร่วมของปัจจัย

ในการกำหนดจุดวิกฤต (ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด หรือจุดอานม้า) จำเป็นต้องมีส่วนของพหุนามที่เป็นเทอมของสมการกำลังสองหรือสมการควอดราติก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.17)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.17)$$

เมื่อ β_{ii} คือ สัมประสิทธิ์เทอมตัวแปรยกกำลังสอง

ในการออกแบบการทดลองต้องมีระดับค่าตัวแปรอิสระอย่างน้อยสามระดับ แผนทางทดลองที่ใช้สำหรับการวางแผนทดลอง ได้แก่ แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล แผนการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นกิน แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและแผนการทดลองแบบ Doehlert

ในการกำหนดพื้นที่ขอบเขตสถานะที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยนำสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์มาพลอตกราฟ ซึ่งกราฟที่สามารถพลอตได้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ กราฟพื้นผิวตอบสนอง และกราฟเส้นโครงร่าง กราฟพื้นผิวตอบสนองเป็นกราฟที่มีลักษณะประกอบด้วย 3 แกนแสดงความสัมพันธ์ของค่าตอบสนองและตัวแปรอิสระ ได้แก่ แกน x แกน y และ แกน z ขณะที่กราฟเส้นโครงร่างจะประกอบด้วยแกน 2 แกน เมื่อกราฟเส้นโครงร่างแสดงโปรไฟล์กราฟในลักษณะเป็นวงกลม จุดศูนย์กลางของระบบจะเป็นจุดที่แสดงค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของค่าตอบสนอง ในกรณีที่กราฟมีโปรไฟล์กราฟลักษณะแบบไฮเปอร์โบลิกหรือพาราโบลิก จุดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดจะอยู่ที่จุดอานม้า (saddle point) (Bezerra *et al.*, 2008; Bas and Boyaci, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ โดยเอกสารฉบับนี้ไม่ได้มีลิขสิทธิ์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปฟักข้าว

Auisakchaiyoung และ Rojanakorn (2015) ได้ศึกษาผลของสภาวะการผลิตฟักข้าวอบแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบโพมแมท ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ปริมาณความเข้มข้นของ methylcellulose โดยศึกษาระดับความเข้มข้นที่ 1, 1.5 และ 2.0% และศึกษาเวลาที่ใช้ในการตีโฟมที่ระยะเวลาการตีโฟมเท่ากับ 0, 10, 20 และ 25 นาที ต่อสมบัติลักษณะโฟม จากนั้นนำไปทำแห้งโดยการเว้ตดูบโฟมลงในภาชนะที่มีความหนาเท่า 1, 2 และ 3 mm นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C โดยใช้ความเร็วลมคงที่ 0.5 m/s ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการตีโฟม และความเข้มข้น methylcellulose ให้สูงขึ้นมีผลให้โฟมมีการขยายตัวมากขึ้น และมีความหนาแน่นลดลง และการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิการทำแห้งเท่ากับ 70°C นาน 60 นาที ที่ระดับความหนาชั้นโฟมเท่ากับ 1 mm เป็นสภาวะการทำแห้งที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีเหมาะสม และมีปริมาณสารพิษชีวเคมีสูงสุด

Kha และคณะ (2010) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตฟักข้าวผงด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ประกอบด้วย ผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (120, 140, 160, 180 และ 200°C) และความเข้มข้นมอลโตเด็คซ์ตริน (10%, 20% and 30%) ต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผง ประกอบด้วย ปริมาณความชื้น ความหนาแน่น สี ความเป็นกรดต่าง วอเตอร์แอกทิวิตี ความสามารถในการละลาย ปริมาณแคโรทีนอยด์ ประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชัน และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยรวม ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 2 ปัจจัยมีผลต่อปริมาณความชื้น ค่าความหนาแน่น ลักษณะสี ปริมาณแคโรทีนอยด์ ประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชัน และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยรวมแต่ไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่าง วอเตอร์แอกทิวิตีและความสามารถในการละลาย จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมพบว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีในเทอมของสี ปริมาณแคโรทีนอยด์และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยรวม เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 120°C และความเข้มข้นมอลโตเด็คซ์ตริน 10% (Kha *et al.*, 2010)

Mai และคณะ (2013) ได้ศึกษาเทคนิคการทำแห้งที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เยื่อหุ้มฟักข้าวต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ ค่าสี และปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระทั้งกลุ่มไฮโดรฟิลิกและกลุ่มไลโปฟิลิกในเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวโดยใช้การทำแห้งแบบสุญญากาศและการทำแห้งแบบลมร้อนจากการศึกษาพบว่าการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส สามารถคงรักษาสภาพสี ปริมาณแคโรทีนอยด์และปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุด โดยสมบัติเหล่านี้สามารถคงสภาพได้ดีเมื่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ระหว่าง 15-18% (Mai *et al.*, 2013)

Kha และคณะ (2014) ได้ศึกษาลักษณะของน้ำมันฟักข้าวที่ผ่านการเอนแคปซูลชันด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ ประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชันของน้ำมัน, ประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชันของเบต้าแคโรทีนและ ไลโคปีน, ปริมาณผลิตภัณฑ์, ปริมาณความชื้น, ดัชนีค่าการละลายตัวและค่าเปอร์ออกไซด์ สร้างความสัมพันธ์และทำนายค่าโดยใช้แบบจำลองพื้นผิวตอบ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและขาออก สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตได้แก่การใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและอุณหภูมิลมร้อนขาออกเท่ากับ 154 และ 80°C ตามลำดับ ภายใต้สภาวะดังกล่าวได้ผลของค่าประสิทธิภาพการเอนแคปซูลชันของน้ำมัน, เบต้าแคโรทีน, ไลโคปีน, และปริมาณผลิตภัณฑ์ผงเท่ากับ 87.22%, 82.76%, 84.29% และ 52.78% ตามลำดับ มีค่าความชื้น ค่าดัชนีการละลาย และ

ค่าเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 4.90%, 90.29% และ 4.06 meq/kg ตามลำดับ น้ำมันฟักข้าวผงที่ผ่านการเอนแคปซูลেশันที่ได้จากการผลิตด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาพบว่ามีค่าสีที่แตกต่างจากค่าสีของน้ำมันฟักข้าวก่อนการเอนแคปซูลেশันเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงสี นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าความเป็นกรดต่าง ความหนาแน่น องค์ประกอบกรดไขมันและลักษณะรูปร่างของอนุภาค ผลิตรัศมีผงสามารถเก็บได้นานและมีความคงที่ดี

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

Pua และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของระดับความดันไอน้ำที่ใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนในการทำแห้งขนุนผงด้วยลูกกลิ้งและความเร็วในการหมุนรอบของลูกกลิ้ง ศึกษาโดยใช้น้ำขนุนที่มีส่วนผสมของเลซิตินจากถั่วเหลืองและกัมอาราบิกในปริมาณ 2.65 g/100g และ 10.28 g/100g ตามลำดับ ศึกษาตัวแปรความเร็วในการหมุนรอบของลูกกลิ้งในช่วงระหว่าง 1 ถึง 3 rpm ใช้ความดันไอน้ำในช่วง 300 ถึง 440 KPa ผลจากการศึกษาพบว่า ทั้งความเร็วรอบในการหมุนของลูกกลิ้งและระดับความดันไอน้ำมีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของขนุนผง ปริมาณความชื้นของผลิตรัศมีผงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลูกกลิ้งมีค่าสูงขึ้นแต่ทำให้คะแนนการประเมินคุณค่าทางประสาทสัมผัสลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตได้แก่ การใช้ความดันไอน้ำที่ 336 KPa และใช้ความเร็วรอบในการหมุนของลูกกลิ้งเท่ากับ 1.2 rpm (Pua *et al.*, 2010)

Chia และ Chong (2015) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของเปลือกแก้วมังกรที่ผลิตด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยใช้ความเร็วหมุนรอบของลูกกลิ้งเท่ากับ 1 rpm และความดันไอน้ำเท่ากับ 2 Bar จากการศึกษาพบว่า ปริมาณเบต้าไซยานินจากผลิตรัศมีผงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของเปลือกแก้วมังกรสดและ สามารถรักษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกได้ถึง 98.62% มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.1315 g/ml และมีค่าการละลาย 51.44% จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลิตรัศมีเปลือกแก้วมังกรที่ผ่านการทำแห้งแบบลูกกลิ้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบผลิตรัศมีอาหารเสริมเพื่อสุขภาพได้ (Chia and Chong, 2015)

Henriquez และคณะ (2014) ได้ศึกษาอัตราการลดลงของสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกแอปเปิ้ลระหว่างการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยใช้อุณหภูมิในการทำแห้งเท่ากับ 110, 120, 130 และ 140°C เป็นเวลา 250 วินาที โดยกำหนดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.2 mm การสูญเสียสารประกอบฟีนอลิกเป็นไปตามปฏิกิริยาไคเนติกอันดับหนึ่ง (First order kinetics) การใช้อุณหภูมิจากการทำแห้งเท่ากับ 110, 120, 130 และ 140°C ส่งผลให้การคงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเป็นไปเท่ากับ 73.13%, 57.28%, 43.40% และ 21.10% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้อุณหภูมิในการทำแห้งเท่ากับ 110°C ได้ผลิตรัศมีที่มีสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด (Henriquez *et al.*, 2014)

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารช่วยทำแห้ง

Ekpong และคณะ (2016) ศึกษาโดยใช้ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่ช่วยทำให้เกิดโฟม และมอลโตเด็คซ์ตรินเป็นสารช่วยทำแห้งที่ปริมาณ 0 %, 5 %, 10 % หรือ 15 % ในการทำแห้งมะขามผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบโฟม ทำแห้งที่อุณหภูมิการทำแห้ง 55°C, 60°C หรือ 70°C พบว่าการเพิ่มขึ้นของมอลโตเด็คซ์ตรินส่งผลให้ค่าความสว่างสูงขึ้นขณะที่ค่าความเป็นสีแดง และสีเหลืองลดลง ค่าความเป็นกรดมีค่าลดลงเมื่อใช้ปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินที่สูงขึ้น อีกทั้งการเพิ่มปริมาณมอลโตเด็คซ์ตริน ยังส่งผลทำให้สมบัติการกระจายตัวมีค่าที่ดีขึ้น จากการทดสอบชิมจากผู้บริโภค

พบว่า การเพิ่มปริมาณของมอลโตเด็กซ์ทรินส่งผลต่อค่าคะแนนความชอบรวมไปทิศทางที่ดี ผลผลิตภัณฑ์มะขามผง ที่มีคะแนนความชอบรวมสูงสุดจากผู้ทดสอบการยอมรับ คือ ผลผลิตภัณฑ์จากการใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทริน 15% ที่อุณหภูมิการทำแห้ง 70°C

Jaya และ Das (2004) ศึกษาผลของกลีเซอรอล โมโนสเตียเรท มอลโตเด็กซ์ทริน และไตรแคลเซียมฟอสเฟต ต่อลักษณะมะม่วงผงจากการทำแห้งแบบสุญญากาศ พบว่า ค่าการดูดกลืนความชื้นของมะม่วงผงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล โมโนสเตียเรท การเกาะตัวกันเป็นก้อน และเวลาที่ใช้ในการไหลมีค่าลดลง เมื่อปริมาณส่วนผสมทั้งสามเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการกระจายเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณส่วนผสมทั้งสามชนิด ในส่วนของค่าความแตกต่างสีของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีค่าลดลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอล โมโนสเตียเรทเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟต และมอลโตเด็กซ์ทรินลดลง จุดอุณหภูมิที่วัสดุเกิดความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของส่วนผสมทั้งสามเพิ่มขึ้น

Minh (2014) ศึกษาการใช้มอลโตเด็กซ์ทรินและเจลาตินในการป้องกันการสูญเสียของแคโรทีนในระหว่างการทำแห้งผักข้าวผง โดยใช้อัตราส่วนปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินหรือเจลาตินต่อปริมาณเยื่อหุ้มผักข้าวผงเท่ากับ 0:1 0.5:1, 1:1, 1.5:1, และ 2:1 โดยน้ำหนักแห้ง และอัตราส่วนปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อปริมาณเจลาตินเท่ากับ 1:0, 0.9:0.1, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของการใช้สารช่วยทำแห้งต่อเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวที่เหมาะสมคือ 1:1 ในขณะที่อัตราส่วนการผสมของมอลโตเด็กซ์ทรินต่อเจลาตินที่สามารถรักษาปริมาณแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุด ได้แก่ (0.5:0.5) น้ำหนักแห้ง ค่าปริมาณแคโรทีนอยด์ในเยื่อหุ้มผักข้าวผงที่ใช้อัตราส่วนของมอลโตเด็กซ์ทรินต่อเจลาติน 1:0, 0.9:0.1, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 มีค่าเท่ากับ 4109.30, 4681.65, 4728.61, 4860.68, 49339.95 และ 5277.30 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ (Minh, 2014)

2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบฟีนอลิก

Parra และคณะ (2016) ศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการเก็บรักษา ต่อความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกของไวน์แดง ที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่าปริมาณ Malvidin-3-glucoside และปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดมีการสูญเสียในระหว่างการเก็บรักษา และการเพิ่มขึ้นของค่าออกเตอรแอกทิวิตี ทำให้การสูญเสียปริมาณสารฟีนอลิกเพิ่มมากขึ้น การลดลงของปริมาณ Malvidin-3-glucoside ความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าความเป็นสีแดงของไวน์แดงผง อย่างไรก็ตามกรดแกลลิกเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีความคงตัวมากที่สุด สำหรับในส่วนของปริมาณอีพิคาเทชิน (epicatechin), คาเทชิน (catechin), กรดคาเฟอิก (caffeic acid) และเรสเวอราทรอล (resveratrol) มีค่าคงที่เมื่อมีค่าออกเตอรแอกทิวิตีอยู่ในช่วง 0.11-0.33

Lorenzo และ Munekata (2016) ได้ศึกษาถึงสารประกอบฟีนอลิกในชาเขียว พบว่า ในชาเขียวประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิด ได้แก่ เคทีซินและอนุพันธ์ รวมถึงสารประกอบฟีนอลิกในกลุ่มของฟลาโวนอยด์และกรดฟีนอลิก สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการลดการเกิดโรค ได้แก่ โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดและหัวใจ โรคเกี่ยวกับระบบประสาท สารประกอบฟีนอลิกในชาเขียวมีสมบัติที่น่าสนใจคือในระหว่างการเก็บรักษาหรือการแปรรูปสมบัติการต้านอนุมูลอิสระจะเพิ่มขึ้นและลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาไลโคปีน

Apinya และ Monthip (2016) ได้ทำการศึกษาผลของอายุการเก็บเกี่ยวฟักข้าว ระยะการเก็บรักษา และวิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้และเครื่องบดแบบลูกบอลต่อปริมาณไลโคปีนในเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวที่ระดับความสุก 3 ระยะ ได้แก่ ระยะแบ่งสี ระยะสุกปานกลางและระยะสุกเต็มที่ จากการทดลองพบว่า หลังจากเก็บรักษาเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวเป็นเวลา 15 วัน ที่อุณหภูมิ $26 \pm 1^{\circ}\text{C}$ พบว่า เยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวที่ระยะแบ่งสีมีปริมาณไลโคปีนอยู่ระหว่าง 0.11- 8.99 mg/100g เยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวที่ระดับความสุกปานกลางมีปริมาณไลโคปีนอยู่ระหว่าง 3.88-22.94 mg/100g และเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวที่ระยะความสุกเต็มที่ที่มีค่า 18.99-90.11 mg/100g นอกจากนี้ยังพบว่าการเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้และเครื่องบดแบบลูกบอลไม่มีผลต่อปริมาณไลโคปีนในเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวที่มีปริมาณไลโคปีนสูงสุดในการทดลอง ได้แก่ เยื่อหุ้มเมล็ดระยะความสุกเต็มที่ เก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 6 วัน

Warangkana และ Visaka (2015) ได้ศึกษาผลของสภาวะในการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยต่อสมบัติเชิงเคมีกายภาพของเยื่อหุ้มฟักข้าวผงอบแห้งรวมถึงปริมาณไลโคปีนในเยื่อหุ้มฟักข้าวผง สภาวะที่ศึกษาได้แก่การใช้อุณหภูมิมลร้อน เท่ากับ 120 150 และ 170°C ร่วมกับการใช้และไม่ใช้มอลโตเด็คซ์ตรินเป็นสารช่วยทำแห้ง โดยแบ่งปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินที่ใช้ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 10% 20% และ 30% (w/w) จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิมลร้อนเข้ามีผลต่อปริมาณไลโคปีนในเยื่อหุ้มฟักข้าวผง และผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณไลโคปีนสูงสุด ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เยื่อหุ้มฟักข้าวผงที่ใช้อุณหภูมิมลร้อนเข้าเท่ากับ 170°C และใช้ปริมาณมอลโตเด็คซ์ตริน 10% (w/w)

2.5.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการพ่นฝอยตบสนอง

Erbay และคณะ (2015) ศึกษาการผลิตชีสผงอบแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้วิธีการพ่นฝอยตบสนองในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ตัวแปรอิสระที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิมลร้อนเข้า มีค่าอยู่ในช่วง $160-230^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิมลร้อนขาออก มีค่าอยู่ในช่วง $60-100^{\circ}\text{C}$ และความดันในการฉีดพ่น มีค่าอยู่ในช่วง 294-588 KPa ในงานวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองแบบ central composite rotatable design (CCRD) ทั้งหมด 20 การทดลอง โดยทำการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลาง 6 ซ้ำ ค่าตบสนองที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาล ปริมาณไขมันอิสระ ค่าดัชนีการละลายตัว ค่าความหนาแน่นของชีสผง และค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอียของกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตชีสผงด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยได้แก่ การใช้อุณหภูมิมลร้อนเข้าเท่ากับ 174°C ความดันในการพ่นฉีด 354 KPa และอุณหภูมิมลร้อนขาออกเท่ากับ 68°C

Atalar และ Dervisoglu (2015) ใช้วิธีการพ่นฝอยตบสนองในการศึกษาการผลิตนมเปรี้ยวเคเฟอร์ผงด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยต่ออัตราการอยู่รอดของจุลินทรีย์ อุณหภูมิมลร้อนขาออก ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยวเคเฟอร์ผงและค่า water activity ตัวแปรอิสระที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิมลร้อนเข้า มีค่าอยู่ในช่วง $120-180^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิของนมเปรี้ยวเคเฟอร์ มีค่าอยู่ในช่วง $4-30^{\circ}\text{C}$ อัตราการปั๊มมีค่าอยู่ในช่วง 20-40% หรือ 240-433 L/hr ในการทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบ central composite rotatable design (CCRD) การจากวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อุณหภูมิมลร้อนเข้ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตบสนองทุกตัวแปร ในขณะที่ปัจจัยอัตราการปั๊มมี

ผลต่อค่าตอบสนองบางตัวแปร และอุณหภูมิของนมเปรี้ยวเคเฟออร์ไม่มีผลต่อค่าตอบสนองทุกตัวแปร นอกจากพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตนมเปรี้ยวเคเฟออร์ผง ได้แก่ การใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าเท่ากับ 135°C และอัตราการป้อนเท่ากับ 35%

Zhong และ wang (2010) ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการสกัดพอลิแซคคาไรด์จากเนื้อลำไยอบแห้งด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคต่อปริมาณพอลิแซคคาไรด์ที่ได้และใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองในการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการสกัด โดยตัวแปรอิสระที่ศึกษา ได้แก่ กำลังของคลื่นอัลตราโซนิค เวลาที่ใช้ในการสกัด และอัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณวัตถุดิบ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณพอลิแซคคาไรด์ที่สกัดได้ ได้แก่ กำลังของคลื่นอัลตราโซนิค เวลาที่ใช้ในการสกัด และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการสกัดกับอัตราส่วนของปริมาณน้ำและปริมาณวัตถุดิบ นอกจากนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด ได้แก่ การใช้กำลังคลื่นอัลตราโซนิคเท่ากับ 680 วัตต์ เวลาในการสกัดที่เหมาะสมคือ 4.5 นาที และใช้อัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณวัตถุดิบเท่ากับ 25 mL/g



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัตถุดิบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- 1) ผลฟักข้าวพันธุ์ผลกลมสุกจากสวนฟักข้าวดวงส้ม จังหวัดกาญจนบุรี 50 kg
- 2) น้ำกลั่น จากภาควิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) มอลโตเด็กซ์ตริน DE10
- 4) กัมอะราบิก
- 5) โซเดียมคาร์บอเนต ของ UNIVAR จากบริษัท Ajax finechem pty Ltd.
- 6) Folin ciocalteu's phenol reagent ของ lobachemie จาก LOBA chemie PVT. Ltd.
- 7) สารมาตรฐานกรดแกลลิก
- 8) สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว
- 9) เฮกเซน
- 10) อะซิโตน จากบริษัทเคมีภัณฑ์

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง OHAUS รุ่น PA-214, Germany
- 2) ถูกลูมินัมฟอยล์
- 3) ไมโครปิเปต
- 4) Water activity meter รุ่น Aqalab AW CX3TE, USA
- 5) ตู้อบลมร้อนรุ่น Memmert UFB400, Germany
- 6) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ รุ่น Memmert oilbath OB22, Germany
- 7) เครื่องวัดสี Colorflex EZ, UK
- 8) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV-vis spectrophotometer รุ่น Biochrom libra S12, England
- 9) กระดาษกรอง whatman เบอร์ 4
- 10) ถังบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวสำหรับวัดค่าการดูดกลืนความชื้น
- 11) เครื่องหมุนเหวี่ยง รุ่น Hetich zentrifugen D-78532, Germany
- 12) เครื่องวัดอุณหภูมิผิวสัมผัสลูกกลิ้งและสายเทอร์โมคัปเปิล Type K
- 13) โซโครมิเตอร์กระเปาะแห้ง-กระเปาะเปียก
- 14) เครื่องปั่นน้ำผลไม้
- 15) หลอดทดลอง

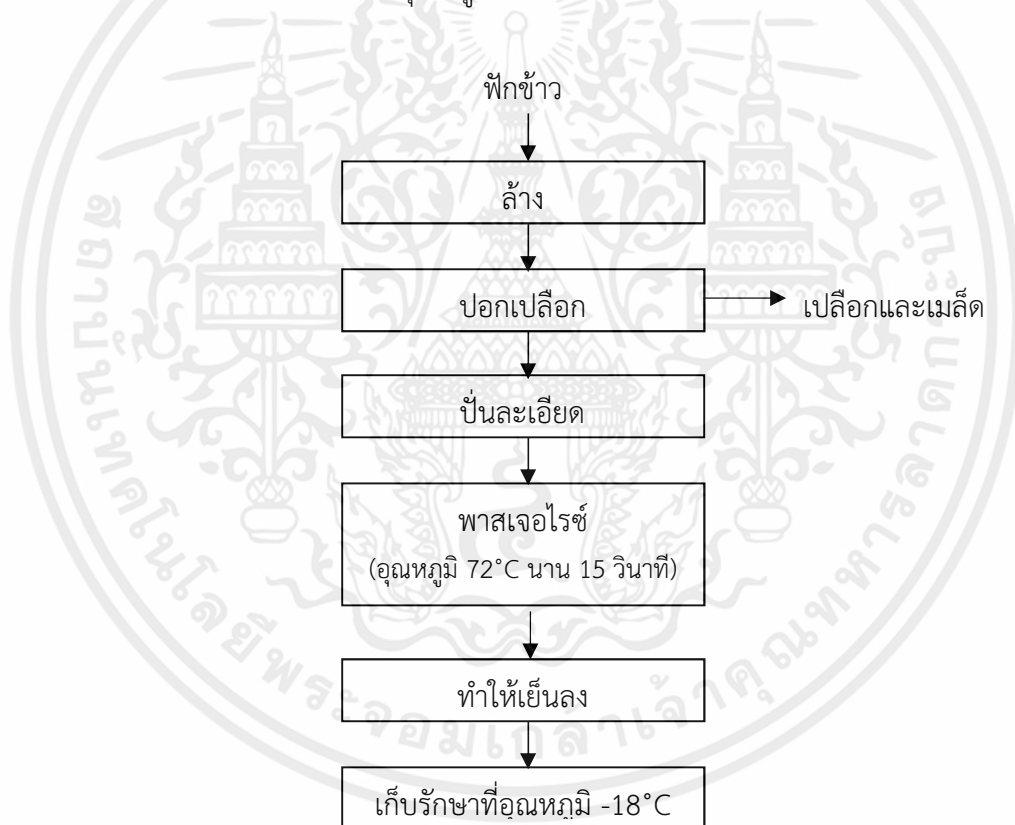
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ข้อมูลนี้เป็นต้นแบบในการค้าและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16) เครื่องเขย่า vortex-Gienie2, USA
- 17) เครื่องกำเนิดไอน้ำ
- 18) เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่จากภาควิชาวิศวกรรมอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 19) เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง รุ่น consort model C830, Belgium
- 20) ตู้แช่แข็ง รุ่น Sanyo SF-C691

3.2 วิธีการดำเนินการ

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เตรียมวัตถุดิบฟักข้าวก่อนการทำแห้ง ล้างผลฟักข้าวด้วยน้ำสะอาด แยกเปลือกและเมล็ดออก นำส่วนเนื้อฟักข้าวปั่นละเอียด นำไปพาสเจอร์ไรซ์ ที่อุณหภูมิ 72°C เป็นเวลานาน 15 วินาที แล้วทำให้เย็นลงจากนั้นนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18°C

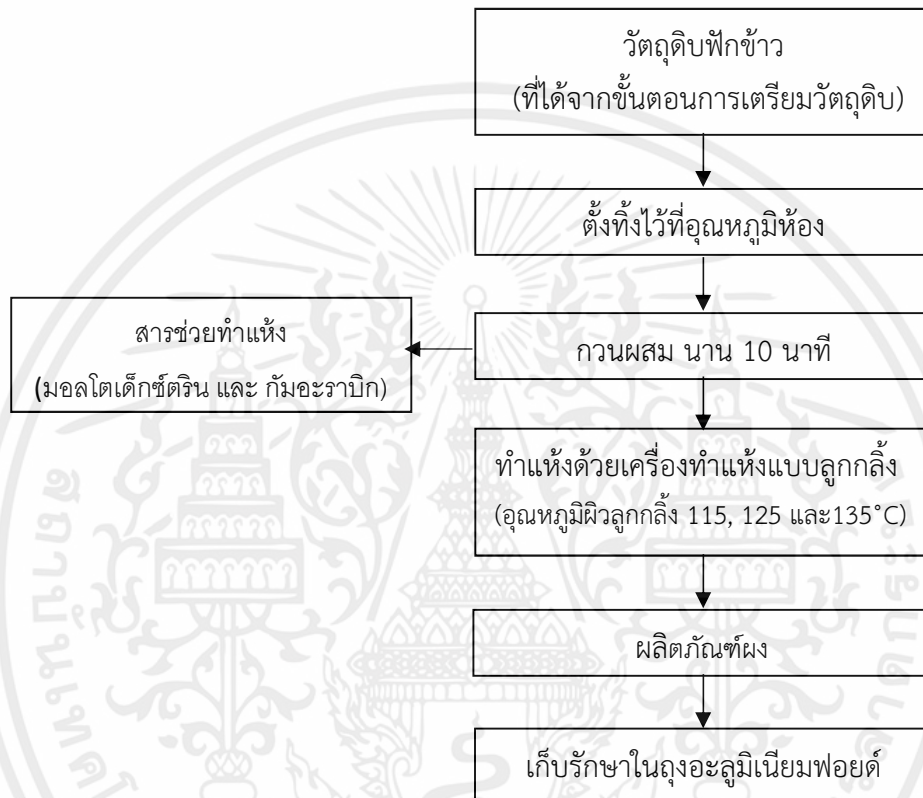


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบฟักข้าว

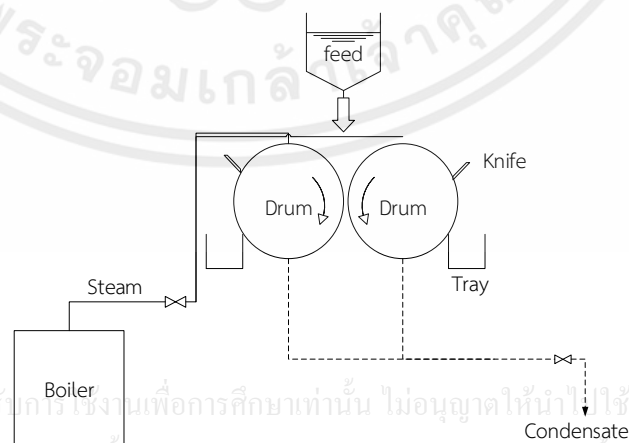
3.2.2 การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

นำวัตถุดิบฟักข้าวที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบฟักข้าว 1200 g มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง กวนผสมสารช่วยทำแห้ง ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ทรินและกัมอะราบิกเป็นเวลานาน 10 นาที จากนั้นนำไปทำแห้ง การทำแห้งใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ จัดเตรียมความพร้อมของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง กำหนดสภาวะการทำงานของเครื่อง ซึ่งประกอบด้วย ความดันไอน้ำ ความเร็วรอบ

ระยะห่างของลูกกลิ้ง อัตราการป้อนวัตถุดิบคงที่ นำวัตถุดิบผสมที่เตรียมป้อนเข้าเครื่องทำแห้ง ปรับระยะใบมีดเหมาะสม อุณหภูมิการทำแห้งในการทดลองแบ่งออกเป็นสามระดับ ได้แก่ 115, 125 และ 135 °C โดยกำหนดความเร็วรอบในการหมุนให้มีค่าคงที่ในทุกการทดลองเท่า 1 rpm เก็บผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้เก็บรักษาไว้ในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่

ตารางที่ 3.1 การเติมปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินและกัมอะราบิก ต่อตัวอย่างฟักข้าว 1200 g

ลำดับ	การเติมปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินและกัมอะราบิก ต่อตัวอย่างฟักข้าว 1200 g		
	อุณหภูมิ (°c)	มอลโตเด็กซ์ตริน (g)	กัมอะราบิก (g)
1	115	120	24
2	115	240	24
3	135	120	24
4	135	240	24
5	115	180	12
6	115	180	36
7	135	180	12
8	135	180	36
9	125	120	12
10	125	120	36
11	125	240	12
12	125	240	36
13	125	180	24
14	125	180	24
15	125	180	24

ตัวอย่างการคำนวณ

ลำดับที่ 1 : ใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน 100% และปริมาณกัมอะราบิก 20% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด

ปริมาณฟักข้าวสด 1200 กรัม มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 120 g

ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน 100% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด = $120 \times \frac{100}{100} = 120$ g

ปริมาณกัมอะราบิก 20% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด = $120 \times \frac{20}{100} = 24$ g

ลำดับที่ 11 : ใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน 200% และปริมาณกัมอะราบิก 10% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด

ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน 200% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด = $120 \times \frac{200}{100} = 240$ g

ปริมาณกัมอะราบิก 10% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด = $120 \times \frac{10}{100} = 12$ g

3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวสด

3.2.3.1 ปริมาณความชื้น

ชั่งตัวอย่างฟักข้าวสด 3.00 g อบด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (Sumic *et al.*, 2016)

3.2.3.2 ค่าสี

วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี (Color Flex EZ, UK) ใช้วัดค่าสีในระบบ CIELAB ความสว่าง (L^*), ค่าสีแดงหรือสีเขียว (a^*), ค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*)

3.2.3.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (ดัดแปลงตามวิธีของ Yang *et al.*, 2010)

ชั่งฟักข้าวสด 6 กรัมนำไปละลายในน้ำกลั่น 21 ml นำไปเขย่านาน 30 นาที จากนั้นดูดส่วนใสของน้ำฟักข้าวมา 0.1 ml ผสมสารละลาย Folin-ciocalteu ปริมาตร 0.5 ml. จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 20% ปริมาตร 1.5 ml บ่มที่อุณหภูมิ 40°C นาน 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 765 nm เทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก คำนวณให้เทียบเท่ากับกรดแกลลิก mg gallic acid equivalent/gram (mgGAE/g)

3.2.3.3 ค่า pH

วัดค่า pH โดยใช้ เครื่อง pH meter ปรับค่ามาตรฐานโดยใช้บัฟเฟอร์ที่ pH เท่ากับ 7 ตามลำดับ

3.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวผง

3.2.4.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ Product Yield (%)

ปริมาณผลผลิตที่ได้ คำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์โดยสมการที่ (3.1)

$$\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักของแข็งเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.4.2 ปริมาณความชื้น

ชั่งตัวอย่าง 3.00 g ลงในถ้วยอะลูมิเนียม นำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (Sumic *et al.*, 2016) ทำซ้ำ 3 ซ้ำ คำนวณหาค่าปริมาณความชื้นจากสมการ (3.2)

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ (g)

W_2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ (g)

3.2.4.3 วอเตอร์แอคทิวิตี้

วัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ด้วยเครื่อง Water activity meter (Aqualab AW CX3TE) ทำซ้ำ 3 ครั้ง

3.2.4.4 ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Color Flex EZ, UK) ในระบบ CIELAB เพื่อวัดค่าความสว่าง/ความมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว (a^*) ค่าความเป็นสีเหลือง/น้ำเงิน (b^*) และคำนวณค่าความแตกต่างสีโดยรวม โดยสมการ (3.3)

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ L^* คือพารามิเตอร์ค่าความสว่างของตัวอย่างฟักข้าวผง

a^* คือพารามิเตอร์ค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่างฟักข้าวผง

b^* คือพารามิเตอร์ค่าความเป็นสีเหลืองของตัวอย่างฟักข้าวผง

L_0^* คือพารามิเตอร์ค่าความสว่างของตัวอย่างฟักข้าวสด

a_0^* คือพารามิเตอร์ค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่างฟักข้าวสด

b_0^* คือพารามิเตอร์ค่าความเป็นสีเหลืองของตัวอย่างฟักข้าวสด

3.2.4.5 ความสามารถในการละลาย (%) (Vidovic *et al.*, 2014)

ใช้ตัวอย่างผง 2.5 g ผสมกับน้ำ 30 ml ใส่ในหลอดบรรจุตัวอย่างสำหรับหมุนเหวี่ยงขนาด 50 ml จากนั้นนำไปปั่นในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 30°C นาน 30 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง 3000 rpm นาน 15 นาที แยกส่วนใสนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C ซ้ำมคืน ค่าความสามารถในการละลาย สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.4

$$\text{ค่าความสามารถในการละลาย(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสารละลายส่วนใสหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.4)$$

3.2.4.6 การดูดกลับความชื้น(gน้ำ/100g น้ำหนักแห้ง) (Bhusari *et al.*, 2014)

วางตัวอย่าง 1 g ในถังที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว เป็นระยะเวลา นาน 14 วัน คำนวณค่าการดูดกลับความชื้นตามสมการที่ (3.5) รายงานเป็นหน่วยกรัมของ ปริมาณความชื้น ต่อน้ำหนักแห้ง 100 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{การดูดกลืนความชื้น} = \frac{\Delta m}{\frac{\Delta m}{m} + 1} = \frac{\Delta m}{(m_i + m)} \quad (3.5)$$

โดยที่ Δm = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังเข้าสู่สมดุล

m = มวลตัวอย่างเริ่มต้น

m_i = ความชื้นตัวอย่างเริ่มต้น

3.2.4.7 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ดัดแปลงตามวิธีการของ Yang *et al.*, (2010)

วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-ciocalteu ซึ่งพักข้าวผง 1.00 g นำไปละลายในน้ำกลั่น 21 ml นำไปเขย่านาน 30 min จากนั้นดูดส่วนใสของน้ำพักข้าวมา 0.1 ml ผสมสารละลาย Folin-ciocalteu ปริมาตร 0.5 ml จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 20% ปริมาตร 1.5 ml บ่มที่อุณหภูมิ 40°C นาน 30 min นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 765 nm คำนวณให้เทียบเท่ากับกรดแกลลิก mg gallic acid equivalent/gram (mgGAE/g)

3.2.4.8 ปริมาณไลโคปีน

วิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์พักข้าวผงตามวิธีของ Nagata and Yamashita (1992) โดยซึ่งตัวอย่างพักข้าวผง 1.00 g ผสมกับสารละลายอินทรีย์ผสม อะซีโตน-เฮกเซน 4:6 (v/v) 10.00 ml จากนั้นนำไปเขย่า 1 นาที ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 453, 505, 645 และ 663 nm นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณไลโคปีนดังสมการ

$$\text{ปริมาณไลโคปีน(mg/100g)} = -0.0458A_{663} + 0.204A_{645} + 0.372A_{505} - 0.0806A_{453} \quad (3.6)$$

เมื่อ A_{663} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 663 nm

A_{645} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 645 nm

A_{505} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 505 nm

A_{453} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 453 nm

3.2.5 แผนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน ทั้งหมด 15 การทดลอง ทำการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลาง 3 ซ้ำ แบ่งค่าตัวแปร 3 ตัวแปร ออกเป็นสามระดับ ดังตารางที่ 3.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาผลกระทบของปัจจัยและสร้างสมการความสัมพันธ์แบบพหุนามกำลังสอง ดังสมการ (3.7)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.7)$$

โดยที่ Y = ค่าของสมบัติผลิตภัณฑ์ผง

X_i = ตัวแปรอิสระ ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง ($^{\circ}\text{C}$) ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน (%) และปริมาณกัมอะราบิก (%)

β_0 = สัมประสิทธิ์การถดถอยที่จุดตัดแกน Y

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ = สัมประสิทธิ์การถดถอยในเทอมของ linear, quadratic และ interaction ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองแบบบ็อก-เบิร์ตทั้งหมด 15 การทดลอง

run	X_1 อุณหภูมิการทำแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)	X_2 มอลโตเด็กซ์ตริน (% ของน้ำหนักแห้งวัตถุดิบ ฟักข้าวสด)	X_3 กัมอะราบิก (% ของน้ำหนักแห้งวัตถุดิบ ฟักข้าวสด)
1	115	100	20
2	115	200	20
3	135	100	20
4	135	200	20
5	115	150	10
6	115	150	30
7	135	150	10
8	135	150	30
9	125	100	10
10	125	100	30
11	125	200	10
12	125	200	30
13	125	150	20
14	125	150	20
15	125	150	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

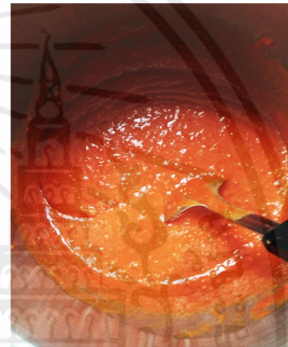
ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 สมบัติของฟักข้าวสดก่อนการทำแห้ง

ส่วนประกอบของฟักข้าวสดที่ใช้ในการทดลองในการวิจัยครั้งนี้ คือส่วนของเนื้อผลและเยื่อหุ้มเมล็ด ซึ่งคิดเป็นปริมาณ 49.41% ของปริมาณฟักข้าวผลสดทั้งหมด จากการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟักข้าวสดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ค่าสี ค่าความเป็นกรดต่างและค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ในส่วนของเนื้อผลและเยื่อหุ้มเมล็ดพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามดังตารางที่ 4.1



ก)



ข)

รูปที่ 4.1 ฟักข้าวสดที่ใช้ในการศึกษา ก) ลักษณะผลฟักข้าวสดที่ใช้ในการศึกษา ข) เยื่อหุ้มเมล็ดและเนื้อผลฟักข้าวปั่นผสม

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบฟักข้าว

สมบัติของวัตถุดิบฟักข้าว	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์
ความชื้น	90.26±0.23 %
ของแข็งที่ละลายได้	7.5 °Brix
ค่าสี	
L^* = ความสว่าง/ความมืด	$L^*=35.92\pm 1.76$
a^* = ความเป็นสีแดง/สีเขียว	$a^*=39.76\pm 2.14$
b^* = ความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน	$b^*=36.64\pm 4.85$
ค่าความเป็นกรดต่าง	6.27
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	6.70±0.01 mgGAE/g
ไลโคปีน	1.67±0.03 mg/100g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นของฟักข้าวสดที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 90.26% มีค่าใกล้เคียงกับฟักข้าวสดที่ใช้ในงานวิจัยของ Minh (2014) ซึ่งมีค่าปริมาณความชื้นในฟักข้าวสดประมาณ 90.20% และมีค่าปริมาณความชื้นและค่าความเป็นกรดต่างใกล้เคียงกับฟักข้าวสดที่ระดับความสุกใกล้เคียงกันในงานวิจัยของ Tran และคณะ (2016) ซึ่งมีความปริมาณความชื้นในผลฟักข้าวอยู่ที่ค่า 88.68-93.96% และมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.73 รวมทั้งมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) ที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 40.11 สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในฟักข้าวสดที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 6.70 mgGAE/g ซึ่งใกล้เคียงกับฟักข้าวที่ใช้ในงานวิจัยของ Kubola and Siriamonpun (2011) ซึ่งทำการวิเคราะห์ค่าฟีนอลิกรวมในฟักข้าวได้สูงสุด 4.29 mgGAE/g

4.2 สมบัติของฟักข้าวผงจากการทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่สภาวะต่าง ๆ

ฟักข้าวผงที่ได้จากการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพต่างๆของฟักข้าวผง ได้แก่ ผลผลิตที่ได้ ความชื้น วอเตอร์แอกทิวิตี สี ความสามารถในการละลาย การดูดกลับความชื้น ปริมาณฟีนอลิกรวมและปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง แสดงดังตารางที่ 4.2 – 4.4 จากข้อมูลตารางนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลกำลังสอง และสร้างกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพฟักข้าวผง



รูปที่ 4.2 ฟักข้าวผงที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ ปริมาณความชื้นผลิตภัณฑ์และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ได้จากการทดลอง

ลำดับ	อุณหภูมิที่ใช้ ในการทำแห้ง (°C)	มอลโตเด็กซ์ ทริน (%น้ำหนัก แห้งของฟัก ข้าวสาค)	กัมอะราบิก (%น้ำหนัก แห้งของฟัก ข้าวสาค)	ผลผลิตที่ได้ (%)	ความชื้น (%)	วอเตอร์ แอกทิวิตี้
1	115	100	20	72.69±1.06	4.93±0.03	0.40±0.05
2	115	200	20	88.63±0.44	4.25±0.32	0.31±0.01
3	135	100	20	78.92±1.18	1.84±0.40	0.28±0.06
4	135	200	20	86.73±0.97	2.07±0.04	0.20±0.01
5	115	150	10	78.57±0.75	4.32±0.15	0.31±0.01
6	115	150	30	77.30±1.67	3.84±0.12	0.26±0.01
7	135	150	10	80.15±1.08	2.04±0.19	0.19±0.01
8	135	150	30	88.28±0.71	2.22±0.15	0.28±0.01
9	125	100	10	80.43±0.88	2.79±0.03	0.25±0.02
10	125	100	30	79.06±0.64	2.55±0.10	0.20±0.00
11	125	200	10	80.93±1.05	2.69±0.10	0.24±0.01
12	125	200	30	80.01±0.44	2.93±0.01	0.23±0.01
13	125	150	20	86.73±0.92	2.93±0.11	0.23±0.01
14	125	150	20	86.05±1.52	3.29±0.07	0.22±0.01
15	125	150	20	81.43±1.00	2.48±0.14	0.20±0.01

สัญลักษณ์ ± หมายถึง ค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าสีของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงที่ได้จากการทดลอง

ลำดับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง (°C)	มอลโตเด็กซ์ทริน (%น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด)	กัมอะราบิก (%น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด)	ค่าสี			
				ค่าความสว่าง L^*	ค่าความเป็นสีแดง a^*	ค่าความเป็นสีน้ำเงิน b^*	ค่าความแตกต่างสี ΔE
1	115	100	20	52.14±0.22	31.44±0.42	47.22±0.97	21.08
2	115	200	20	56.68±1.46	29.37±0.19	44.25±0.68	24.44
3	135	100	20	54.40±0.12	28.03±0.43	48.45±0.43	24.87
4	135	200	20	64.07±0.05	26.16±0.20	48.18±0.40	33.33
5	115	150	10	55.52±0.35	31.04±0.18	47.60±0.41	24.10
6	115	150	30	56.39±0.51	31.32±0.13	47.84±0.66	24.82
7	135	150	10	57.75±0.35	28.10±0.19	48.93±0.20	27.64
8	135	150	30	57.32±0.58	27.70±0.20	47.11±0.44	26.70
9	125	100	10	53.24±0.12	29.47±0.11	46.31±0.33	22.35
10	125	100	30	56.42±0.35	30.14±0.16	48.92±0.19	25.76
11	125	200	10	55.76±0.04	29.36±0.43	47.58±0.54	24.94
12	125	200	30	58.73±0.10	28.70±0.23	48.59±0.30	28.02
13	125	150	20	58.42±0.18	29.57±0.18	48.67±0.12	27.48
14	125	150	20	56.69±0.21	31.62±0.18	48.55±0.21	25.29
15	125	150	20	57.26±0.24	27.99±0.04	47.46±0.18	26.67

สัญลักษณ์ ± หมายถึง ค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถในการละลาย การดูดกลับความชื้น สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและไลโคปีน ในผลิตภัณฑ์

ลำดับ	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง (°C)	มอลโตเด็กซ์ ทริน (%น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด)	กัมอะราบิก (%น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด)	การละลาย (%)	การดูดกลับความชื้น (g/100g)	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด mgGAE/g	ปริมาณไลโคปีน mg/100g
1	115	100	20	57.58±1.48	14.62±0.13	5.90±0.02	0.14±0.03
2	115	200	20	58.17±1.42	13.28±0.22	3.42±0.01	0.13±0.03
3	135	100	20	68.00±0.78	15.81±0.02	8.51±0.04	0.16±0.07
4	135	200	20	76.29±0.40	14.54±0.10	4.89±0.02	0.15±0.03
5	115	150	10	58.92±2.09	13.15±0.73	3.90±0.06	0.13±0.03
6	115	150	30	63.91±1.32	13.73±0.09	4.31±0.05	0.13±0.02
7	135	150	10	74.03±0.56	15.05±0.06	7.35±0.01	0.18±0.02
8	135	150	30	73.95±0.81	15.05±0.13	6.06±0.06	0.13±0.01
9	125	100	10	64.52±0.73	14.91±0.42	6.44±0.00	0.15±0.02
10	125	100	30	62.25±1.25	16.29±2.02	6.49±0.01	0.18±0.02
11	125	200	10	66.19±0.79	14.18±0.30	5.16±0.01	0.12±0.04
12	125	200	30	67.96±1.24	14.27±0.20	5.50±0.06	0.14±0.02
13	125	150	20	66.80±1.67	14.00±0.20	6.93±0.17	0.12±0.02
14	125	150	20	67.60±0.97	14.00±1.11	4.60±0.04	0.16±0.02
15	125	150	20	67.34±1.07	14.23±0.44	5.54±0.03	0.13±0.03

สัญลักษณ์ ± หมายถึง ค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

การจากศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าตัวแปรค่าสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 เมื่อพารามิเตอร์ Y คือ สมบัติทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผง, X_1 คือ อุณหภูมิที่ผิวลูกกลิ้งคู่ ($^{\circ}\text{C}$), X_2 คือ ปริมาณมอลต์เด็กซ์ตริน (%) และ X_3 คือ ปริมาณกัมอะราบิก (%)

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

พารามิเตอร์	สัมประสิทธิ์การถดถอย	ผลผลิตผงที่ได้ (%)	ความชื้น (%)	วอเตอร์แอกทิวิตี	การเปลี่ยนแปลงสี	ความสามารถในการละลาย (%)	การดูดกลับความชื้น (g/100g)	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mgGAE/g dry solid)	ไลโคปีน (mg/100g dry solid)
intercept	β_0	-155.89	87.8439**	10.7888	19.2372	-36.4979	-6.1373	-62.9691	0.0065
X_1	β_1	2.8851	-1.1382*	-0.1523	-0.0651	0.9894	0.3221	0.0904	0.00009
X_2	β_2	0.8049	-0.0630	-0.0048	-0.2080	-0.2209	-0.0749*	0.0179	0.0010
X_3	β_3	-1.8564	-0.1827	-0.0407	0.8865	1.3125	0.2016	0.5136	0.0158
$X_1 \cdot X_1$	β_{11}	-0.0101	0.0036	0.0005	-3.3×10^{-5}	-0.0025	-0.0009	-0.0024	0.000016
$X_2 \cdot X_2$	β_{22}	-0.0007	1×10^{-6} *	1.13E-05	-0.0002	-0.0007**	0.0002***	0.000097	0.0000035
$X_3 \cdot X_3$	β_{33}	-0.0264	-0.0016	-0.0001	-0.0066	0.0071	0.0025*	0.0003	0.000026
$X_1 \cdot X_2$	β_{12}	-0.0040	0.0004	5.5E-06	0.0025	0.0038**	4×10^{-5}	0.0005	0.0000021
$X_2 \cdot X_3$	β_{23}	0.0002	0.0002	2.12E-05	-0.0001	0.0005	-0.0006**	0.0001	0.0000017
$X_1 \cdot X_3$	β_{13}	0.0235	0.0016	0.0003	-0.0041	-0.0126*	-0.0014	0.0042	0.00013

หมายเหตุ *** หมายถึง ระดับการมีนัยสำคัญ $p < 0.01$

** หมายถึง ระดับการมีนัยสำคัญ $p < 0.05$

* หมายถึง ระดับการมีนัยสำคัญ $p < 0.1$

ตารางที่ 4.6 สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) และค่านัยสำคัญ (p-value)

สมบัติทางเคมีกายภาพฟัก ข้าวผง	สมการความสัมพันธ์	R^2	SE	P-value
ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Y_1)	$Y_1 = -155.89 + (2.885155X_1) + (0.804997X_2) - (1.85648X_3) - (0.01014X_1^2) - (0.00079X_2^2) - (0.02646X_3^2) - (0.00407X_1X_2) + (0.000222X_2X_3) + (0.023508X_1X_3)$	0.6668	4.4217	0.4791
ปริมาณความชื้น (Y_2)	$Y_2 = 87.84399 - (1.13828X_1) - (0.06309X_2) - (0.18276X_3) + (0.003685X_1^2) + (0.00000117X_2^2) - (0.00163X_3^2) + (0.00046X_1X_2) + (0.00024X_2X_3) + (0.001667X_1X_3)$	0.9476	0.3573	0.0102**
วอเตอร์แอกทีวิตี (Y_3)	$Y_3 = 10.50235 - (0.1476X_1) - (0.00459X_2) - (0.04282X_3) + (0.000543X_1^2) + (0.0000106X_2^2) - (0.00011X_3^2) + (0.000005X_1X_2) + (0.0000212X_2X_3) + (0.00035X_1X_3)$	0.7956	0.0427	0.2047
การเปลี่ยนแปลงสี (Y_4)	$Y_4 = 19.23729 - (0.06516X_1) - (0.20802X_2) + (0.886533X_3) - (0.000033X_1^2) - (0.00022X_2^2) - (0.00665X_3^2) + (0.00255X_1X_2) - (0.00016X_2X_3) - (0.00414X_1X_3)$	0.8133	2.0366	0.1714
ความสามารถในการละลาย (Y_5)	$Y_5 = -36.4979 + (0.989454X_1) - (0.22095X_2) + (1.312556X_3) - (0.00257X_1^2) - (0.00079X_2^2) + (0.007121X_3^2) + (0.003851X_1X_2) + (0.00052X_2X_3) - (0.01266X_1X_3)$	0.9883	1.0032	0.0002***
การดูดกลับความชื้น (Y_6)	$Y_6 = -6.13 + (0.322169X_1) - (0.07497X_2) + (0.201646X_3) - (0.00091X_1^2) + (0.000232X_2^2) + (0.002595X_3^2) + (0.0000397X_1X_2) - (0.00064X_2X_3) - (0.00147X_1X_3)$	0.9794	0.2064	0.0010***
ปริมาณฟีนอลิครวม (Y_7)	$Y_7 = -62.96 + 0.90X_1 + 0.01X_2 + 0.51X_3 - 0.002X_1^2 + 0.000097X_2^2 - 0.00034X_3^2 - 0.00057X_1X_2 + 0.000149X_2X_3 - 0.00423X_1X_3$	0.8103	0.9939	0.1769
ปริมาณไลโคปีน (Y_8)	$Y_8 = 0.0065 - 0.00009X_1 - 0.00101X_2 + 0.0015X_3 + 0.0000166X_1^2 + 0.0000035X_2^2 + 0.000026X_3^2 - 0.0000021X_1X_2 - 0.0000017X_2X_3 - 0.00013X_1X_3$	0.6127	0.0200	0.5929

หมายเหตุ *** หมายถึง ระดับการมีนัยสำคัญ $p < 0.01$
 ** หมายถึง ระดับการมีนัยสำคัญ $p < 0.05$
 * หมายถึง ระดับการมีนัยสำคัญ $p < 0.1$

4.4 ผลของอุณหภูมิการทำแห้ง มอลโตเด็กซ์ตรินและกัมอะราบิกต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวผง

4.4.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้

ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นปริมาณผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงเทียบกับปริมาณของแข็งในวัตถุดิบก่อนการทำแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 72.69- 88.63% ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ผงมากที่สุด ได้แก่ ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน จากรูปที่ 4.3 พบว่า ที่ระดับปริมาณกัมอะราบิก 20 ถึง 30% น้ำหนักของแห้งของฟักข้าวสด การใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีทิศทางไปในทางเดียวกันกับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง จากภาพเดียวกัน พบว่าการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้น ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น ในส่วนผลของกัมอะราบิกพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณกัมอะราบิกจาก 10% ถึง 20% น้ำหนักแห้งของฟักข้าวสด ส่งผลให้ค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มีค่าสูงขึ้นจาก 83% เป็น 86% โดยมีสมการความสัมพันธ์คณิตศาสตร์ดังสมการ ที่ 4.1

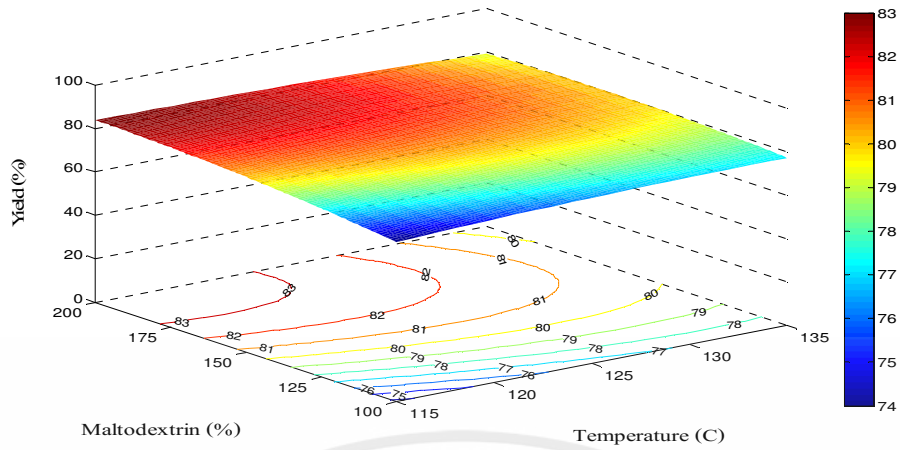
$$Y_1 = -155.89 + (2.885155X_1) + (0.804997X_2) - (1.85648X_3) - (0.01014X_1^2) - (0.00079X_2^2) - (0.02646X_3^2) - (0.00407X_1X_2) + (0.000222X_2X_3) + (0.023508X_1X_3) \quad (4.1)$$

โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.6668

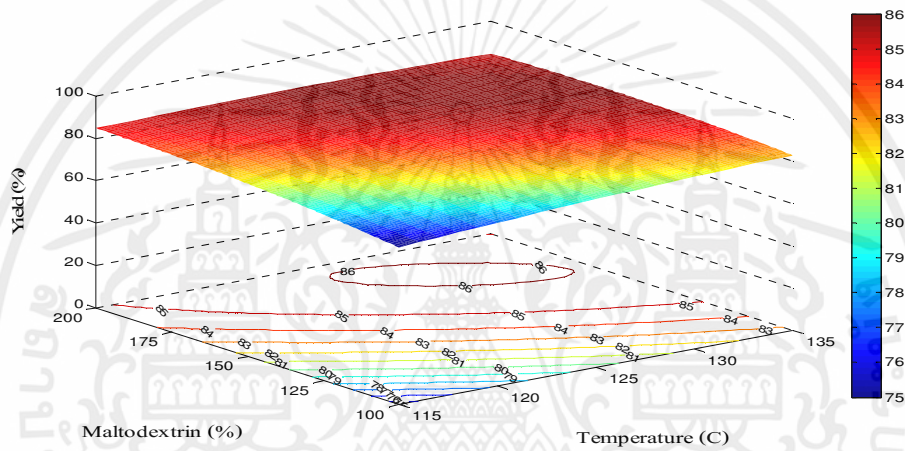
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 4.4217

ค่า P-Value เท่ากับ 0.4791

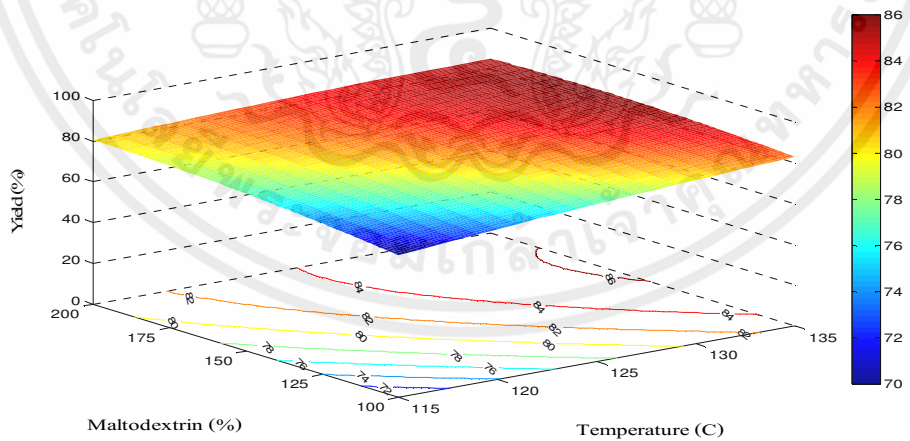
เนื่องจากการใช้อุณหภูมิและสารช่วยทำแห้งในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทมวลเกิดได้ดีขึ้น การใช้สารช่วยทำแห้งในกระบวนการทำแห้งมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหาเกิดการเหนียวเกาะติดกันระหว่างผลิตภัณฑ์กับอุปกรณ์การทำแห้ง (Bhusari *et al.*, 2014) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fazaeli และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันเบอร์รี่ผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินและปริมาณกัมอะราบิกที่สูงขึ้น เช่นเดียวกันกับ Kha และคณะ (2014) ซึ่งได้ทำการศึกษาสภาวะในการทำแห้งผลิตภัณฑ์น้ำมันฟักข้าวด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและอุณหภูมิลมร้อนขาออกที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันฟักข้าวมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากหากอุณหภูมิการทำแห้งที่สูงไม่มากพอทำให้ไม่สามารถระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดปัญหาผลิตภัณฑ์เกิดการเหนียวเกาะติดกับผนังอุปกรณ์การทำแห้ง อย่างไรก็ตามที่ระดับปริมาณกัมอะราบิก 20-30 % น้ำหนักของแห้งของฟักข้าวสด การใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่มีค่าอยู่ในช่วง 150-200% น้ำหนักของแห้งของฟักข้าวสด เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณฟักข้าวผงที่ได้เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ที่ปริมาณกัมอะราบิก 10% ในช่วงปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินเดียวกัน การใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่สูงส่งผลให้ค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเนื่องมาจากระดับปริมาณสารกัมอะราบิกซึ่งมีสมบัติความเป็นอิมัลซิไฟเออร์น้อยเกินไปสำหรับวัตถุดิบ ทำให้เกิดการขาดสมบัติความเป็นอิมัลชันส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอหรือการใช้มอลโตเด็กซ์ตรินที่ปริมาณสูงเกินไปทำให้วัตถุดิบลักษณะขุ่นเหนียวติดเป็นแผ่นกับอุปกรณ์การทำแห้ง (Tanon *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังตารางที่ 4.6 อาจเป็นเนื่องมาจากเพราะผิวสัมผัสของลูกกลิ้งที่ใช้ในการทดลองไม่มีความสม่ำเสมอจึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนต่อผลการทดลอง



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินต่อค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์เท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ การนำออกไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์

ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าอยู่ในช่วง 1.84-4.93% โดยทั่วไปอาหารแห้งควรมีความชื้นไม่เกินกว่า 5% เป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของลักษณะอาหารผงที่ดีและปลอดภัยต่อการเสื่อมเสีย (Zhang *et al.*, 2018) ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณความชื้นมากที่สุดได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอุณหภูมิการทำแห้งมีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 90% จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์คณิตศาสตร์ได้ดังสมการ ที่ 4.2

$$Y_2 = 87.84399 - (1.13828X_1) - (0.06309X_2) - (0.18276X_3) + (0.003685X_1^2) + (0.00000117X_2^2) - (0.00163X_3^2) + (0.00046X_1X_2) + (0.00024X_2X_3) + (0.001667X_1X_3) \quad (4.2)$$

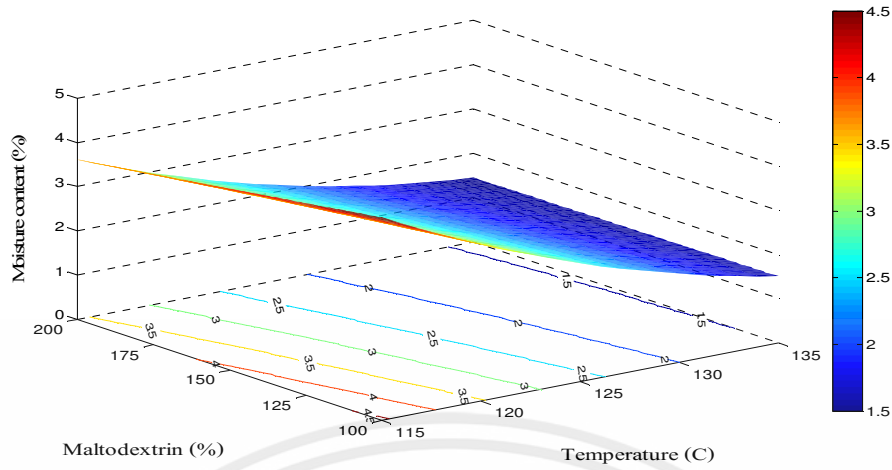
โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9476

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 0.3573

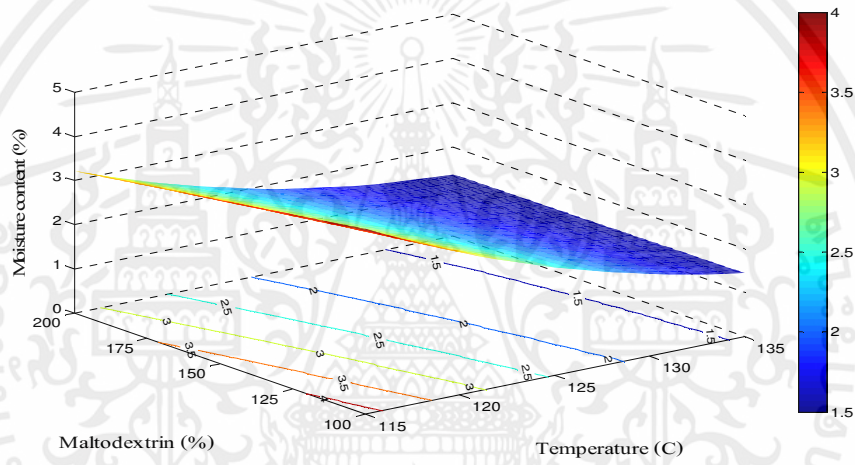
ค่า P-Value เท่ากับ 0.0102

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ทริน (รูปที่ 4.4) พบว่า การใช้ปริมาณมอลโตเด็คซ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงลดลง เนื่องจากการใช้ปริมาณมอลโตเด็คซ์ทรินเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งให้กับวัตถุดิบทำให้สัดส่วนความชื้นที่ต้องระเหยมีค่าลดลง (Ekpong *et al.*, 2016; Mishra 2014) ผลการทดลองดังกล่าวมีผลไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยอื่น ได้แก่ การศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำขิงผง น้ำสับประรดผง ด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการผลิตน้ำแตงโมผงโวลูวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Jittanit *et al.*, 2010; Phoungchandang and Sertwasana, 2010; Oberoi and Sogi, 2015) ในส่วนของผลของอุณหภูมิการทำแห้งต่อสมบัติลักษณะผลิตภัณฑ์พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการทำแห้งส่งผลให้ค่าความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงเนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการทำแห้งที่สูงกว่าทำให้อัตราการการทำแห้งสูงกว่า สามารถระเหยน้ำในวัสดุได้ดีกว่า ผลของตัวแปรดังกล่าวมีงานวิจัยที่สอดคล้อง ได้แก่ การผลิตน้ำมะขามผงการผลิตขนุนผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง พบว่าการใช้ความดันไอน้ำหรือการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่ระดับสูงส่งผลให้ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าการใช้ไอน้ำที่ระดับต่ำ (Thankitsunthorn *et al.*, 2009; Pua *et al.*, 2010 ; Jittanit *et al.*, 2011) ในส่วนของผลของกัมอะราบิกต่อสมบัติลักษณะผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกัมอะราบิกเพิ่มขึ้นจาก 10% ถึง 30% น้ำแห้งของฟักข้าวสด ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลงจาก 4.5% เป็น 4% และ 3% ตามลำดับผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pua และคณะ (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษาปริมาณของซอซีตินและกัมอะราบิกในการผลิตขนุนผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ขนุนผงที่มีปริมาณกัมอะราบิกสูงกว่าจะมีค่าปริมาณความชื้นต่ำกว่า เนื่องจากกัมอะราบิกมีสมบัติในการป้องกันการตกผลึกน้ำตาลและมีสมบัติก่อให้เกิดความเป็นอิมัลชันกับวัตถุดิบเพื่อส่วนวิฎกภาคไขมันกระจายอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ Gabas และคณะ (2007) ได้ศึกษาผลของมอลโตเด็คซ์ทรินต่อสมบัติซอร์พชันไอโซเทอร์มของน้ำและสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสับประรดผงที่ผลิตด้วยวิธีการทำแห้งแบบสูญญากาศพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้กัมอะราบิกมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการใช้กัมอะราบิก

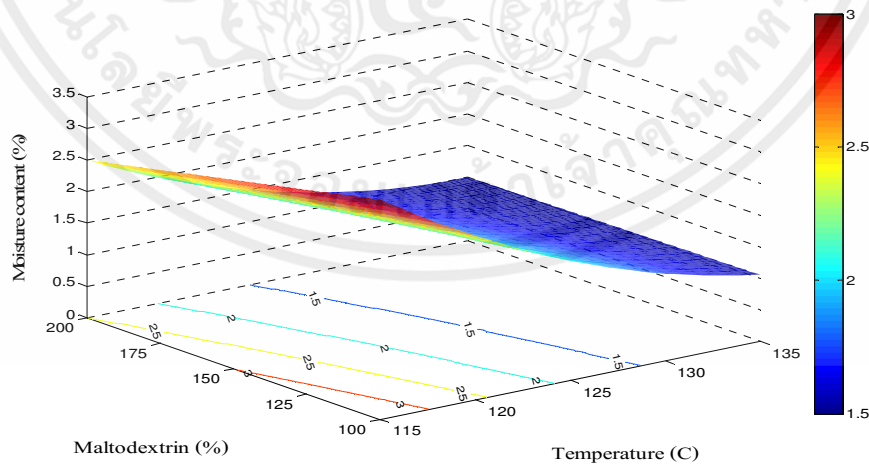
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินต่อค่าความชื้น

4.4.3 วอเตอร์แอกทิวิตี

วอเตอร์แอกทิวิตี หรือค่าวอเตอร์แอกทิวิตี เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงวอเตอร์แอกทิวิตีในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษาของอาหาร อาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ต่ำกว่า 0.6 จะสามารถลดความเสี่ยงในการเจริญของจุลินทรีย์ได้ อย่างไรก็ตามอาหารประเภทที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบและมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่ต่ำกว่า 0.2 จะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจากสารอนุมูลอิสระ (Kha *et al.*, 2014) การจากวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.19 - 0.40 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่มีค่ามากที่สุดพบในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวในสภาวะการทำแห้งที่ใช้อุณหภูมิในการทำแห้งเท่ากับ 115 °C ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน 100%ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด และใช้ปริมาณกัมอะราบิก 20% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด จากภาพความสัมพันธ์ รูปที่ 4.5 พบว่า ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี มีค่าต่ำเมื่อใช้อุณหภูมิการทำแห้งอยู่ในค่าระหว่าง 120-130°C ในส่วนของการใช้สารช่วยทำแห้งพบว่า การใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินและปริมาณกัมอะราบิกที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี มีค่าลดลง สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยการแห้งต่อค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงแสดงดังสมการที่ 4.3

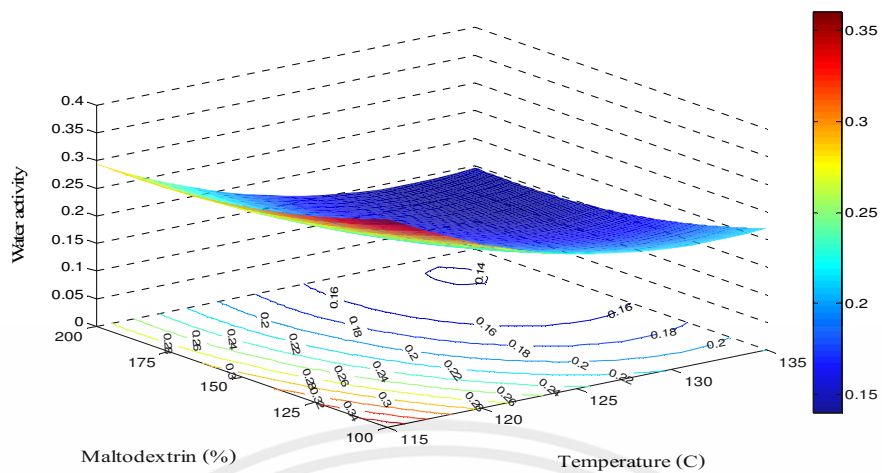
$$Y_3 = 10.50235 - (0.1476X_1) - (0.00459X_2) - (0.04282X_3) + (0.000543X_1^2) + (0.0000106X_2^2) - (0.00011X_3^2) + (0.000005X_1X_2) + (0.0000212X_2X_3) + (0.00035X_1X_3) \quad (4.3)$$

โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.7956

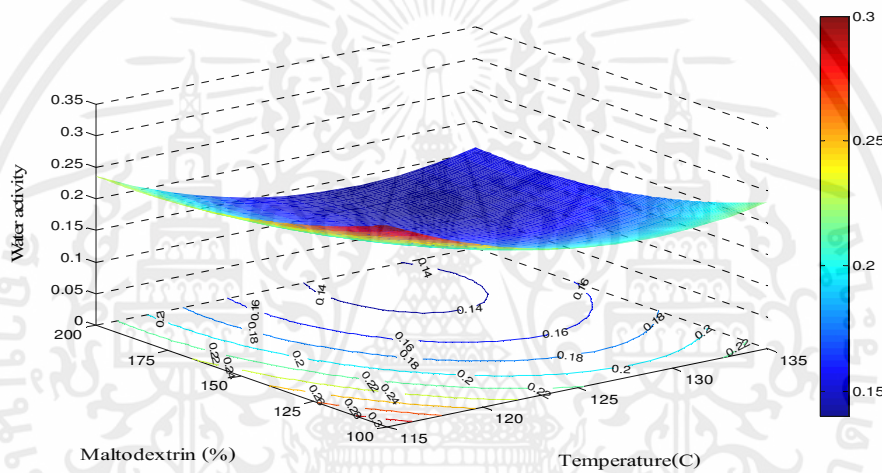
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 0.0427

ค่า P-Value เท่ากับ 0.2047

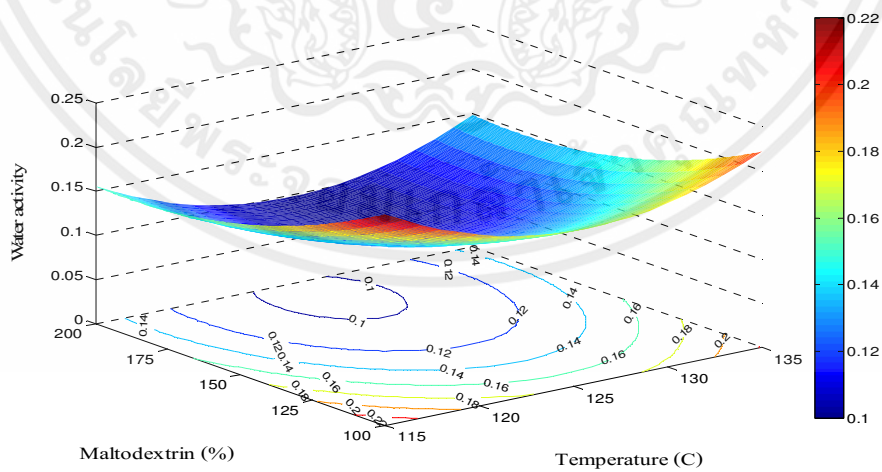
เนื่องจากการใช้มอลโตเด็กซ์เป็นสารที่มีสมบัติการดูดซับความชื้นต่ำส่งผลให้การดูดซับความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง การเพิ่มปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินจึงเป็นการลดปริมาณตัวทำละลายของน้ำหรือปริมาณอิสระในผลิตภัณฑ์ลดลง (Fabra *et al.*, 2011) เมื่อเปรียบเทียบค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่สูงที่สุดของแต่ละปริมาณกัมอะราบิกที่ต่างกันพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณกัมอะราบิกจาก 10% เป็น 20% และ 30% ทำให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ลดลงจาก 0.35 เป็น 0.30 และ 0.22 ตามลำดับ



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินต่อค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้

4.4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสี

จากการเปรียบเทียบค่าสีระหว่างฟักข้าวสดและฟักข้าวผงพบว่าค่าความเป็นสีแดงของฟักข้าวผงมีค่าลดลง (a^*) มีค่าอยู่ในช่วง 26.16-31.62 จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงมีค่าลดลง เนื่องจากแรงควัตถุสีแดงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อสัมผัสความร้อน (Arocho *et al.*, 2012) นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณของกัมอะราบิกจาก 10% ถึง 30% ของน้ำหนักฟักข้าวผงส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวสดที่มีค่าสูงที่สุดลดลงจาก 30.5 เป็น 30 และ 29.5 ตามลำดับและส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงของฟักข้าวผงที่มีค่าต่ำสุดมีค่าลดลงจาก 27 เป็น 25.5 และ 24.5 ตามลำดับ ค่าความสว่าง (L^*) ของฟักข้าวผงมีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 52.14-64.07 โดยค่าความสว่างส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุด การใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างสูงขึ้นและการเพิ่มขึ้นของปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินส่งผลให้ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกัมอะราบิกไม่มีความสัมพันธ์ต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง ค่าการเปลี่ยนแปลงสีอยู่ในช่วง 21.08-33.32 จากกราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสี (รูปที่ 4.8) พบว่าการใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินและอุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความแตกต่างสีเพิ่มขึ้น และปริมาณกัมอะราบิกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการทำแห้งต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ผงในด้านการเปลี่ยนแปลงสี ค่าความเป็นสีแดง และค่าความสว่างแสดงดังสมการ ที่ (4.4) (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ

$$Y_4 = 19.23729 - (0.06516X_1) - (0.20802X_2) + (0.886533X_3) - (0.000033X_1^2) - (0.00022X_2^2) - (0.00665X_3^2) + (0.00255X_1X_2) - (0.00016X_2X_3) - (0.00414X_1X_3) \quad (4.4)$$

โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.8133

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 2.0366

ค่า P-Value เท่ากับ 0.1714

$$Y_{\text{ความสว่าง}} = 64.74 - 0.24X_1 - 0.18X_2 + 0.80X_3 + 0.00035X_1^2 - 0.00027X_2^2 - 0.0075X_3^2 + 0.0025X_1X_2 - 0.00011X_2X_3 - 0.0032X_1X_3 \quad (4.5)$$

โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.7888

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 2.0925

ค่า P-Value เท่ากับ 0.2180

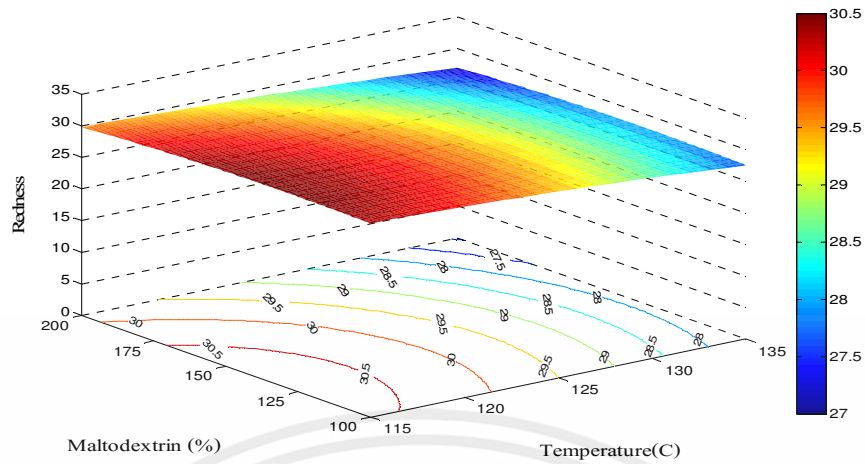
$$Y_{\text{ค่าความเป็นสีแดง}} = -22.51 + 0.92X_1 + 0.052X_2 + 0.21X_3 - 0.0042X_1^2 - 0.00022X_2^2 + 0.0024X_3^2 + 0.0010X_1X_2 - 0.00066X_2X_3 - 0.0016X_1X_3 \quad (4.6)$$

โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.7930

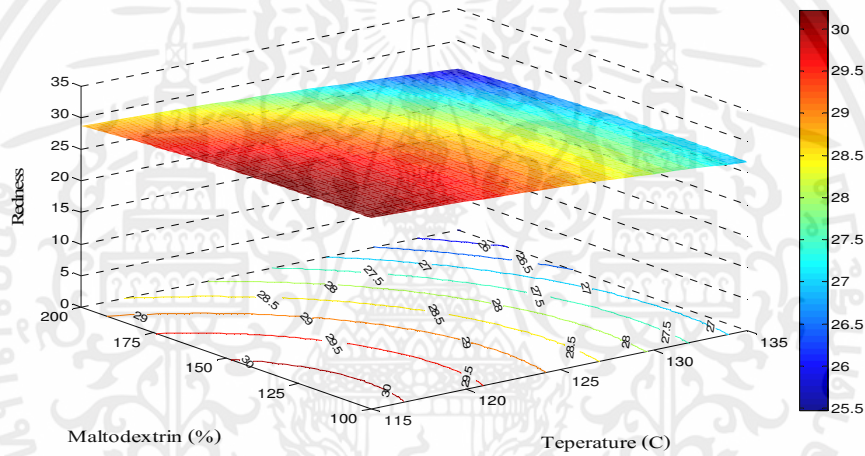
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 1.2109

ค่า P-Value เท่ากับ 0.2097

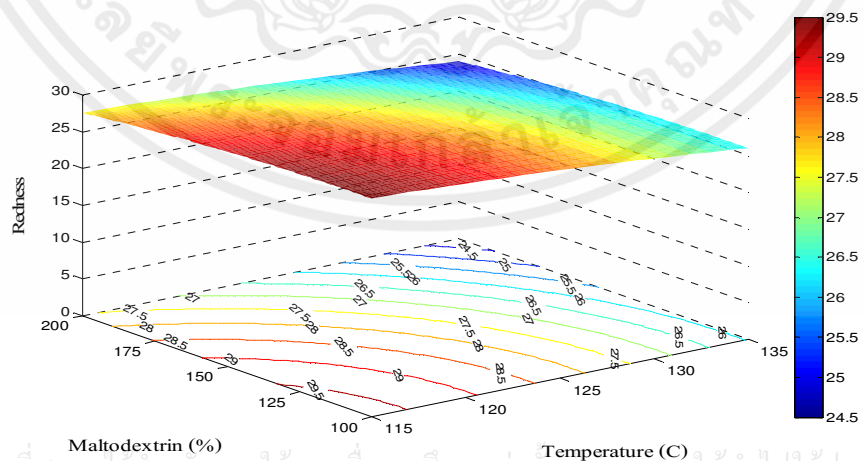
ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kha และคณะ (2010) ได้ศึกษาการผลิตฟักข้าวผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้นมีผลให้ค่าความแตกต่างสีเพิ่มขึ้น Bhusari และคณะ (2014) ได้ศึกษาการใช้วัตถุเจือปนอาหาร ได้แก่ มอลโตเด็กซ์ทริน กัมอะราบิก และโปรตีนเวย์ ในการผลิตน้ำมะขามผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า การใช้ปริมาณวัตถุเจือปนอาหารเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้นและค่าความเป็นสีแดงลดลง เนื่องจากสีธรรมชาติของวัตถุเจือปนอาหารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี



กัมอะราบิก 10%

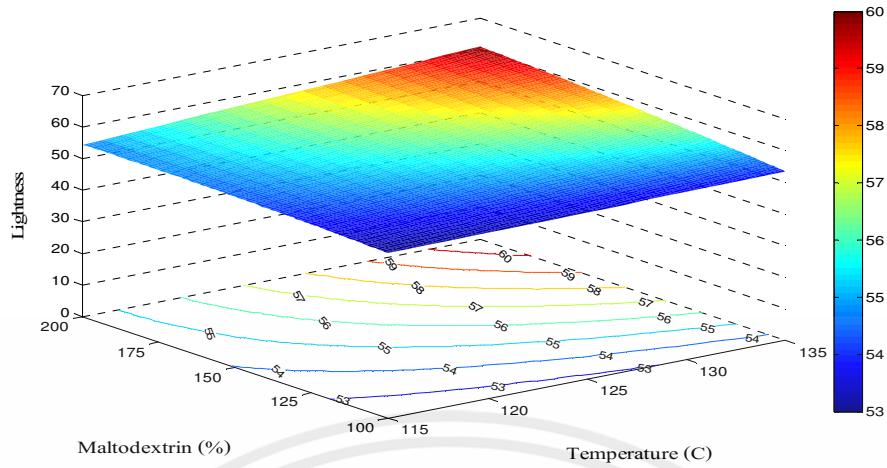


กัมอะราบิก 20%

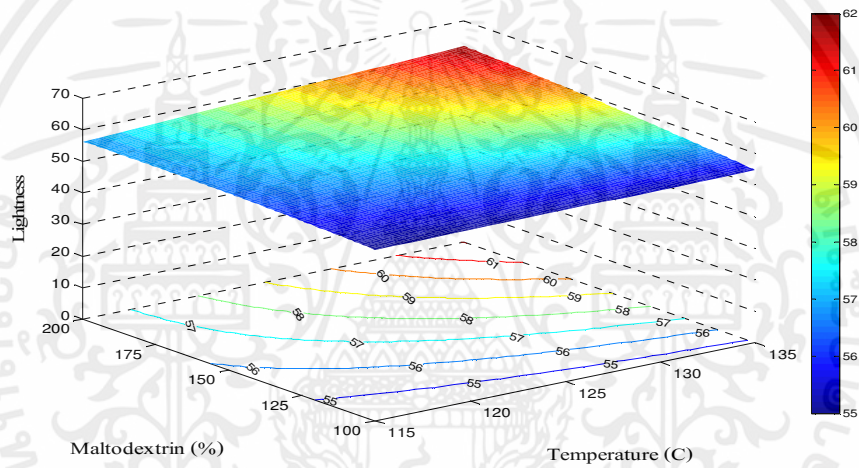


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อกัมอะราบิก 30% จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

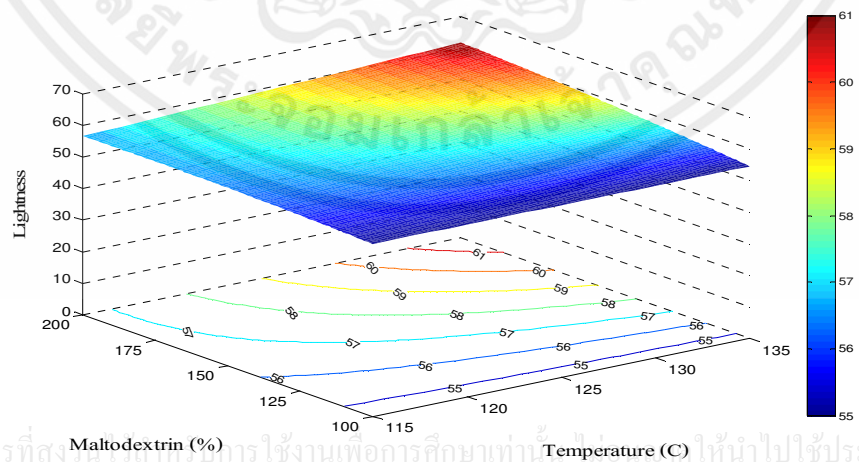
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินต่อค่าความเป็นสีแดง



กัมอะราบิก 10%

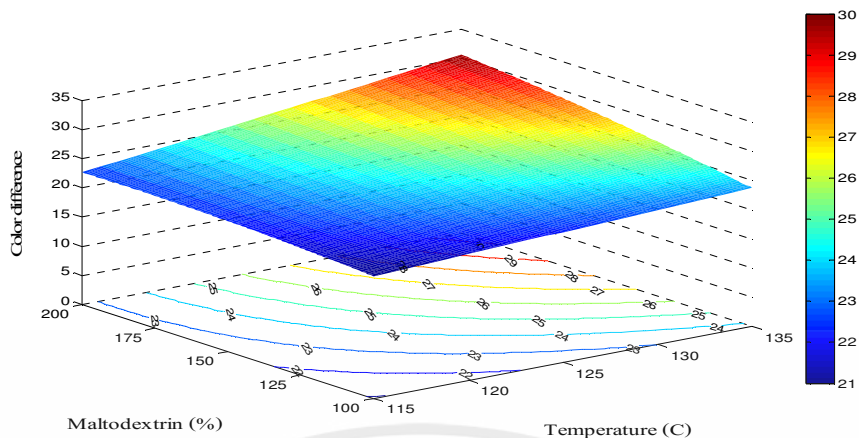


กัมอะราบิก 20%

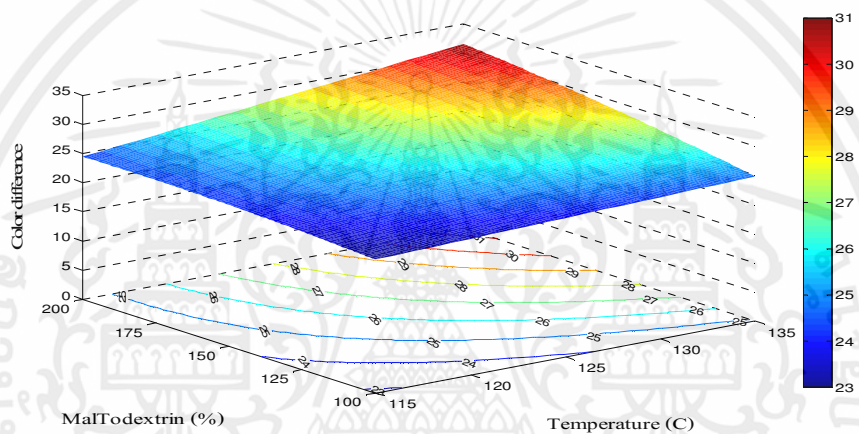


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ กัมอะราบิก 30% จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

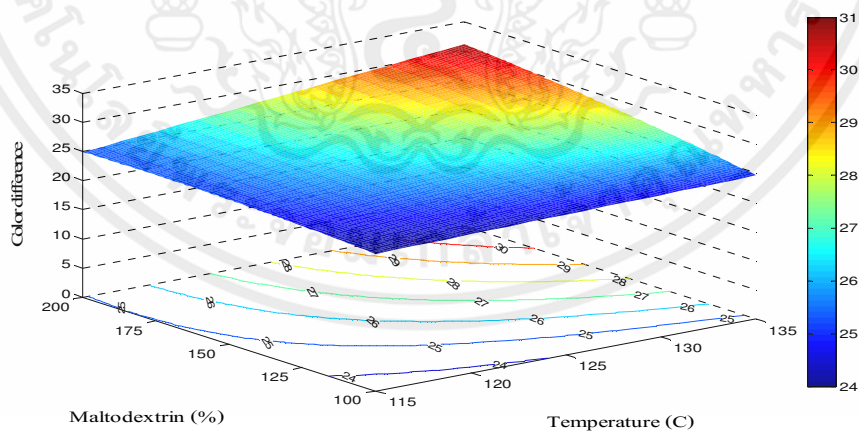
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินต่อค่าความสว่าง



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

เอกสารรูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสีและการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ค่าความสามารถในการละลาย

สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ผงในด้านความสามารถในการละลายน้ำเป็นสมบัติข้อหนึ่งที่ควรนำมาพิจารณาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผง เพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้ประโยชน์และการเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Caliskan and Dirim, 2013) ค่าความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าอยู่ในช่วง 57.57-76.28% ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการละลายมากที่สุด คือ ปัจจัยที่ส่งผลร่วมกัน (Interaction effect) ระหว่างปริมาณมอลโตเด็คทรีนกับอุณหภูมิการทำแห้งและปัจจัยจากมอลโตเด็คทรีนเทอมกำลังสอง (Quadratic effect) โดยทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากกราฟความสัมพันธ์ (รูปที่ 4.9) พบว่า การใช้อุณหภูมิในการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คทรีนที่สูงขึ้นมีผลให้ค่าความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์ผงสูงขึ้น กัมมะราบิกส่งผลต่อค่าความสามารถในการละลายเพียงเล็กน้อย ที่ระดับปริมาณกัมมะราบิก 10% มีค่าการละลายของฟักข้าวผงต่ำสุดเท่ากับ 58% การเพิ่มปริมาณกัมมะราบิกเป็น 20% และ 30% ทำให้ค่าความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นเป็น 60% และ 62% ตามลำดับ สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยการแห้งต่อค่าความสามารถในการละลายของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงดังสมการที่ 4.7

$$Y_5 = -36.4979 + (0.989454X_1) - (0.22095X_2) + (1.312556X_3) - (0.00257X_1^2) - (0.00079X_2^2) + (0.007121X_3^2) + (0.003851X_1X_2) + (0.00052X_2X_3) - (0.01266X_1X_3) \quad (4.7)$$

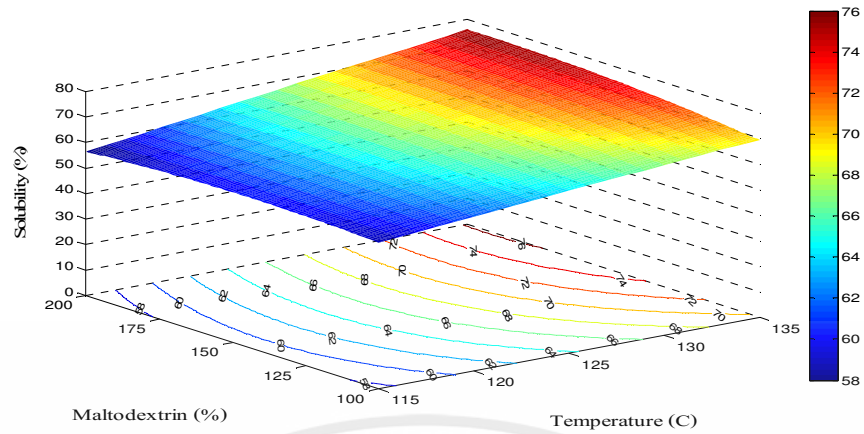
โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9883

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 1.0032

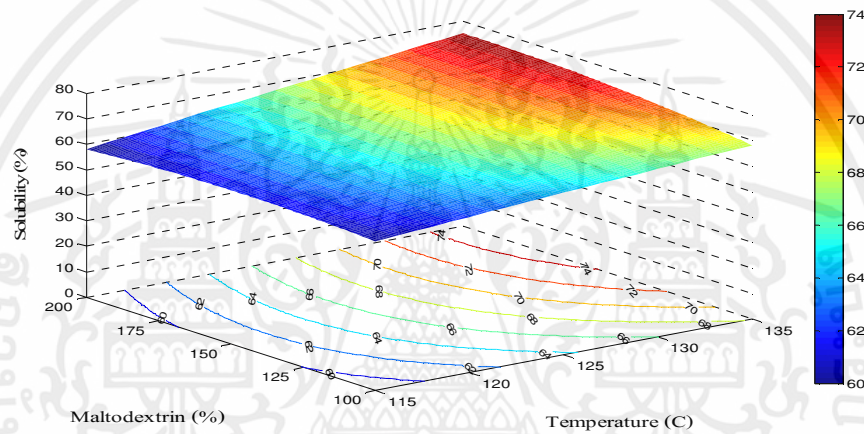
ค่า P-Value เท่ากับ 0.0002

ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vidovic และคณะ (2014) ได้ทำการทดลองผลิตเครื่องเทศผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าการใช้ปริมาณมอลโตเด็คทรีนที่สูงขึ้นทำให้มีค่าดัชนีการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ผงสูงขึ้น เนื่องจากมอลโตเด็คทรีนและกัมมะราบิกมีสมบัติการละลายน้ำที่ดี รวมถึงการศึกษาของ Jittanit และคณะ (2010) ซึ่งได้ศึกษาผลของปริมาณมอลโตเด็คทรีนต่อสมบัติการละลายของน้ำสับปะรดผงที่ผลิตด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณมอลโตเด็คทรีนส่งผลให้น้ำสับปะรดผงมีสมบัติการละลายน้ำที่ดีขึ้น เนื่องจากมอลโตเด็คทรีนมีสมบัติในการเพิ่มค่าอุณหภูมิสถานะแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ทำให้ลดการจับตัวเป็นก้อนของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อนุภาคผงมีพื้นที่ในการสัมผัสน้ำและเกิดการละลายได้ดี Fazaeli และคณะ (2012) ได้กล่าวว่าการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าการละลายสูงขึ้นเนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ผงเกิดลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ที่สัมผัสน้ำมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Santhalakshmy และคณะ (2015) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิม้วนขาเข้าต่อสมบัติการละลายของน้ำลูกหว่าที่ผลิตด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้อุณหภูมิม้วนขาเข้าอยู่ระหว่าง 140°C - 160°C พบว่าค่าดัชนีการละลายของผลิตภัณฑ์น้ำลูกหว่าผงที่ผลิตด้วยอุณหภูมิม้วนขาเข้า 160°C มีค่าที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์น้ำลูกหว่าผงที่ผลิตด้วยอุณหภูมิม้วนขาเข้า 150°C และ 140°C ตามลำดับ (Jittanit *et al.*, 2011; Fazaeli *et al.*, 2012)

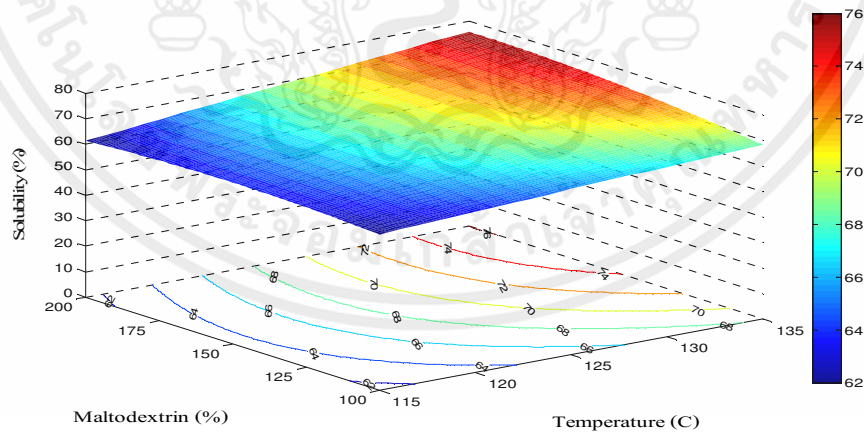
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมิใช่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อค่าการละลายด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 ค่าการดูดกลับความชื้น

การดูดกลับความชื้น (Hygroscopicity) คือ สมบัติในการดึงดูดและกักเก็บความชื้นจากสิ่งแวดล้อม ผลิตภัณฑ์ที่มีการดูดกลับความชื้นสูงจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเหนียว (Food stickiness) และจับตัวกันเป็นก้อน (Caking) ในระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา ค่าการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าอยู่ในช่วง 13.14-16.28 g/100g โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลับความชื้นมากที่สุดได้แก่ ปัจจัยของปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินเทอมกำลังสอง (Quadratic effect) และปัจจัยที่ส่งผลร่วมกัน (Interaction effect) ระหว่างมอลโตเด็กซ์ทรินกับกัมอะราบิก ตามลำดับ โดยทั้งสองปัจจัยมีผลต่อสมบัติการดูดกลับความชื้นในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงอย่างมีนัยสำคัญสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากรูปที่ 4.10 พบว่าการใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่มากขึ้นมีผลให้ค่าการดูดกลับความชื้นมีแนวโน้มต่ำลง ในส่วนของผลของอุณหภูมิการทำแห้งต่อค่าการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงพบว่า การใช้อุณหภูมิกำแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าสูงขึ้น ในส่วนของผลของกัมอะราบิกต่อค่าการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงพบว่า การใช้ปริมาณกัมอะราบิกจาก 10% เป็น 20% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสด ไม่ส่งผลต่อค่าการดูดกลับความชื้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกเป็น 30% ของน้ำหนักแห้งฟักข้าวสดส่งผลให้ค่าการดูดกลับความชื้นมีค่าสูงขึ้น อาจมีผลมาจากสมบัติการดูดกลับความชื้นตามธรรมชาติของกัมอะราบิก (Frenandes *et al.*, 2013) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยการแห้งต่อค่าการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงดังสมการที่ (4.8)

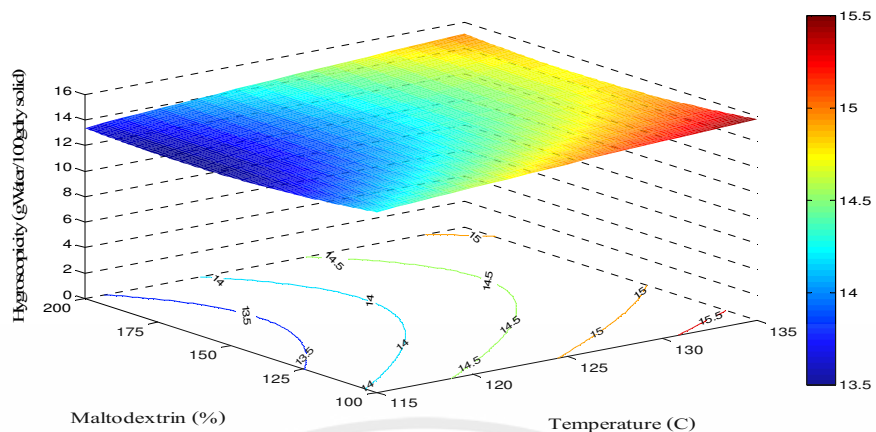
$$Y_6 = -6.13 + (0.322169X_1) - (0.07497X_2) + (0.201646X_3) - (0.00091X_1^2) + (0.000232X_2^2) + (0.002595X_3^2) + (0.0000397X_1X_2) - (0.00064X_2X_3) - (0.00147X_1X_3) \quad (4.8)$$

โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9794

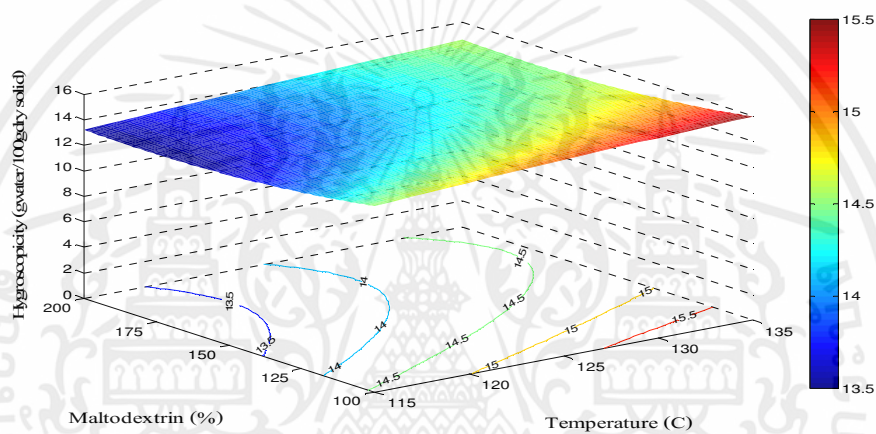
ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 0.2064

ค่า P-Value เท่ากับ 0.0010

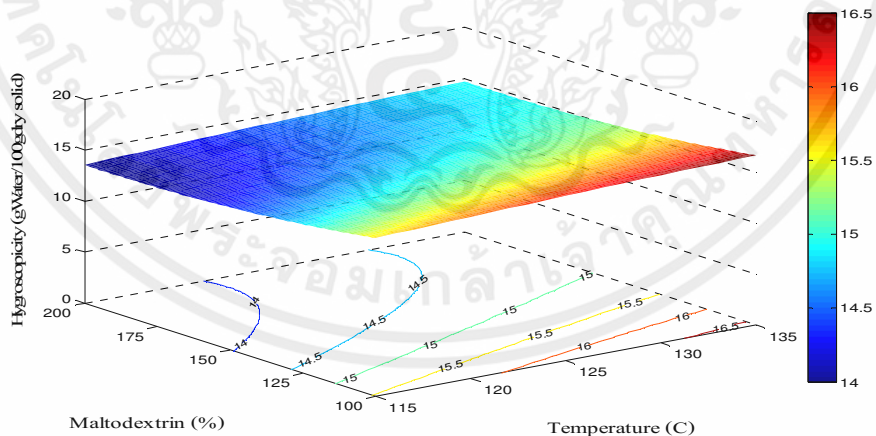
เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ทรินมีสมบัติที่ช่วยปรับปรุงความสมดุลของส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic/Hydrophobic sites) ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำลดลง การใช้สารช่วยทำแห้งในผลิตภัณฑ์ส่งผลต่อการดูดกลับความชื้นในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากความแตกต่างในการดูดกลับความชื้นซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยทำแห้ง ในกรณีที่สารช่วยทำแห้งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรต การดูดซับน้ำเกิดจากการเกิดพันธะระหว่างไฮโดรเจนในโมเลกุลน้ำและกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ในวัสดุ (Kurozawa *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2018) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhusari และคณะ (2014) ศึกษาการใช้สารเจือปนในอาหารในการผลิตมะขามผงด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า การใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าการดูดกลับความชื้นต่ำลง เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์ผงที่มีอุณหภูมิสถานะแก้วสูงนั้นมีค่าการดูดกลับความชื้นต่ำ ซึ่งการใช้ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่สูงขึ้นเป็นการเพิ่มอุณหภูมิสถานะแก้วจากการวิเคราะห์ความชื้นในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ปริมาณความร้อนที่สูงขึ้นส่งผลให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการดูดกลับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้สูงขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Santhalakshmy และคณะ (2015) ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิร้อนขาเข้าต่อสมบัติการดูดกลับความชื้นของน้ำลูกหว้าผงที่ผลิตโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าค่าการดูดกลับความชื้นของผลิตภัณฑ์ลูกหว้าผงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.00 ถึง 25.35 g/100g เมื่ออุณหภูมิร้อนขาเข้าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 140°C-160°C



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็คซ์ตรินต่อค่าการดูดกลับความชื้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารสำคัญจากธรรมชาติที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย จากการวิเคราะห์ค่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในผักข้าวผงพบว่ามีความอยู่ในช่วง 3.27-8.35 mgGAE/g จากภาพความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (รูปที่ 4.11) พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงขึ้น ส่วนปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่สูงขึ้นมีผลให้ค่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลง ในส่วนของผลของปริมาณกัมอะราบิกต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ผักข้าวผงในงานวิจัยนี้พบว่า การใช้ปริมาณกัมอะราบิกเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 20% ของน้ำหนักแห้งในวัตถุดิบผักข้าวผงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ผักข้าวผง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณกัมอะราบิกเป็น 30% ของน้ำหนักแห้งในวัตถุดิบผักข้าวผง พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ผักข้าวผงมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากกัมอะราบิกเป็นสารที่สามารถช่วยลดการสะสมของอนุมูลอิสระ นอกจากนี้มีการรายงานพบว่ากัมอะราบิกมีสมบัติความเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากกรดอะมิโนในกัมอะราบิก ได้แก่ กรดอะมิโนชนิด histidine, tyrosine และ lysine นอกจากนี้กัมอะราบิกยังประกอบด้วยสารประกอบโพลีฟีนอล โพลีแซคคาไรด์ และสารประกอบแทนนิน (Montenegro *et al.*, 2012) สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยการทำแห้งต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 4.9

$$Y_7 = -62.96 + 0.90X_1 + 0.01X_2 + 0.51X_3 - 0.002X_1^2 + 0.000097X_2^2 - 0.00034X_3^2 - 0.00057X_1X_2 + 0.000149X_2X_3 - 0.00423X_1X_3 \quad (4.9)$$

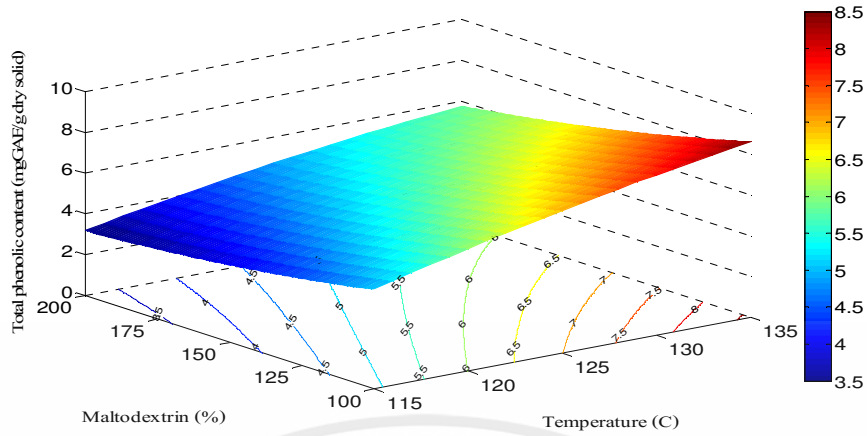
โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.8103

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 0.9939

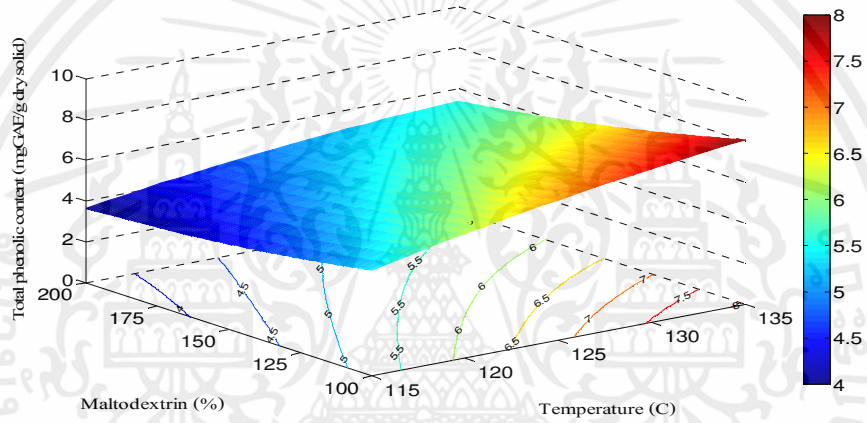
ค่า P-Value เท่ากับ 0.1769

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Trirattanapikul และ Phoungchandang (2016) ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวด้วยวิธีการทำแห้งแบบถาด การทำแห้งแบบปั๊มความร้อนและการทำแห้งโดยใช้ไมโครเวฟพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการทำแห้งและกำลังวัตต์ของไมโครเวฟสูงขึ้น และงานวิจัยของ Mishra และคณะ (2014) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำมะขามป้อมผงที่ผลิตด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในผลิตภัณฑ์มะขามป้อมผงมีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าสูงขึ้นจาก 125°C ถึง 175°C และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำมะขามป้อมผงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าสูงกว่า 175°C เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ของสารประกอบฟีนอลิก รวมถึงการสังเคราะห์โพลีฟีนอลเกิดขึ้นที่สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ในส่วนของผลของปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในน้ำมะขามป้อมผงพบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่ใช้มีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งทำให้สัดส่วนของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในมะขามป้อมผงลดลง (Mishra *et al.*, 2014)

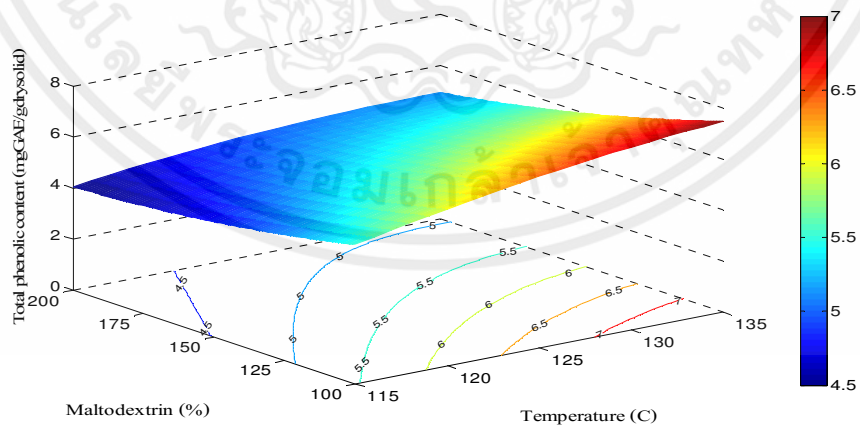
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กัมอะราบิก 10%



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ถูกต้องเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด
 ไม่ว่าจะวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.8 ปริมาณไลโคปีน

จากการวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนจากการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ อะซีโตน:เฮกเซน ในอัตราส่วน 4:6 ปริมาตรต่อปริมาตร พบว่า ค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.11-0.17 mg/100g อย่างไรก็ตามกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งสามารถสร้างได้จากสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 4.10 พบว่า ที่ปริมาณกัมอะราบิก 10% และ 20% ผลของอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินต่อค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีทิศทางไปในทางเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าสูงขึ้น และเมื่อปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินสูงขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงลดลง ในขณะที่การใช้ปริมาณกัมอะราบิก 30% อุณหภูมิการทำแห้งไม่มีผลต่อค่าปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงและปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณไลโคปีนในผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณกัมอะราบิกที่สูงขึ้นจาก 10% 20% และ 30% ส่งผลให้ค่าไลโคปีนสูงสุดมีค่าลดลงจาก 0.18 เป็น 0.165 และ 0.158 ตามลำดับ

$$Y_g = 0.0065 - 0.00009X_1 - 0.00101X_2 + 0.0015X_3 + 0.0000166X_1^2 + 0.0000035X_2^2 + 0.000026X_3^2 - 0.0000021X_1X_2 - 0.0000017X_2X_3 - 0.00013X_1X_3 \quad (4.10)$$

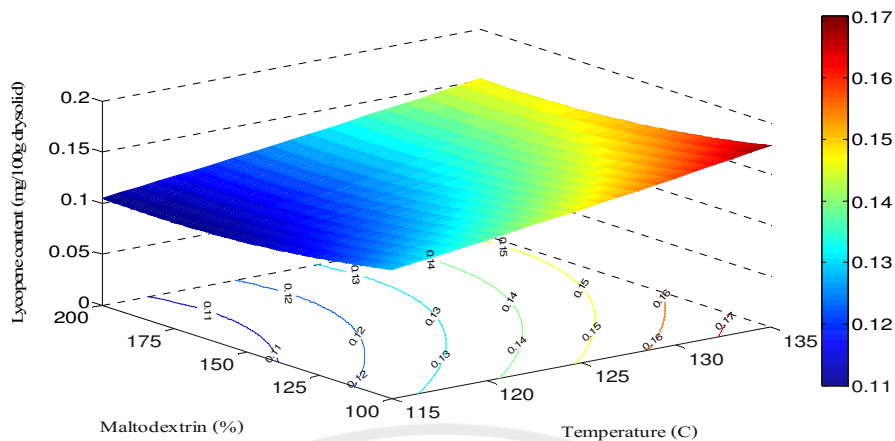
โดยมีค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.6127

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) เท่ากับ 0.0200

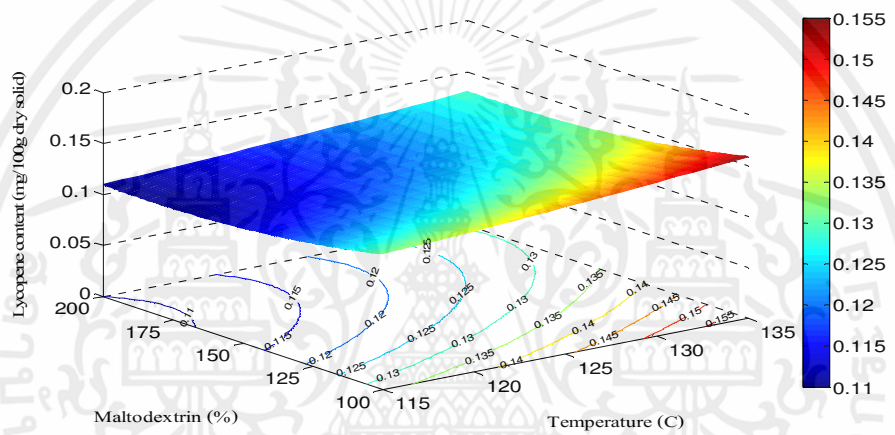
ค่า P-Value เท่ากับ 0.5929

ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Warangkana and Visaka (2015) ได้ศึกษาการผลิตเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย พบว่า การใช้อุณหภูมิร้อนเข้าสูงส่งผลให้ ปริมาณไลโคปีนในเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนเป็นสาเหตุในการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Isomerization) โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบ all-trans lycopene เป็น cis-isomer lycopene ซึ่ง cis-isomer lycopeneมีความสามารถในการดูดซึมมากกว่า all-trans lycopene จึงมีรายงานว่า ไลโคปีนจากผลิตภัณฑ์มะเขือเทศแปรรูปที่ผ่านกระบวนการความร้อนสามารถวัดค่าการดูดกลืนได้มากกว่าผลิตภัณฑ์มะเขือเทศสด ในขณะที่งานวิจัยของ Ajmera (2006) และ oberoi and sogi (2015) ได้รายงานว่ามีปริมาณมอลโตเด็กซ์ทรินที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณไลโคปีนในน้ำแดงโสมงที่ผลิตจากกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าลดลง

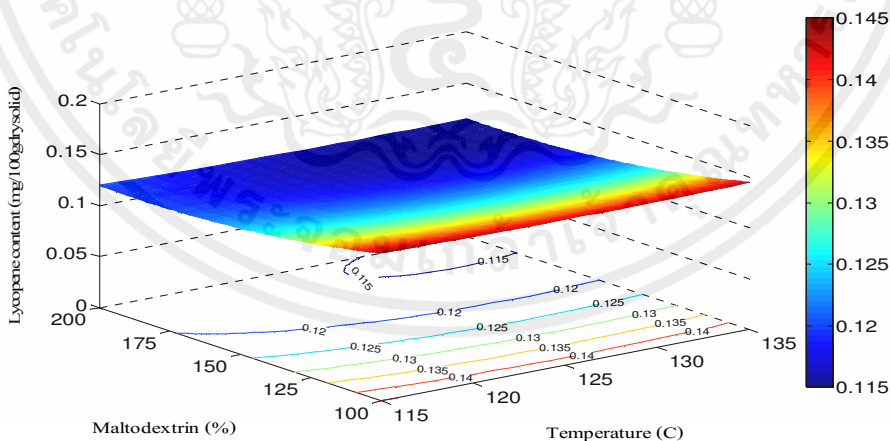
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กัมอะราบิก 10 %



กัมอะราบิก 20%



กัมอะราบิก 30%

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการทำแห้งและมอลโตเด็คซ์ทรินต่อปริมาณไลโคปีนในผักขี้หวง

4.5 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต

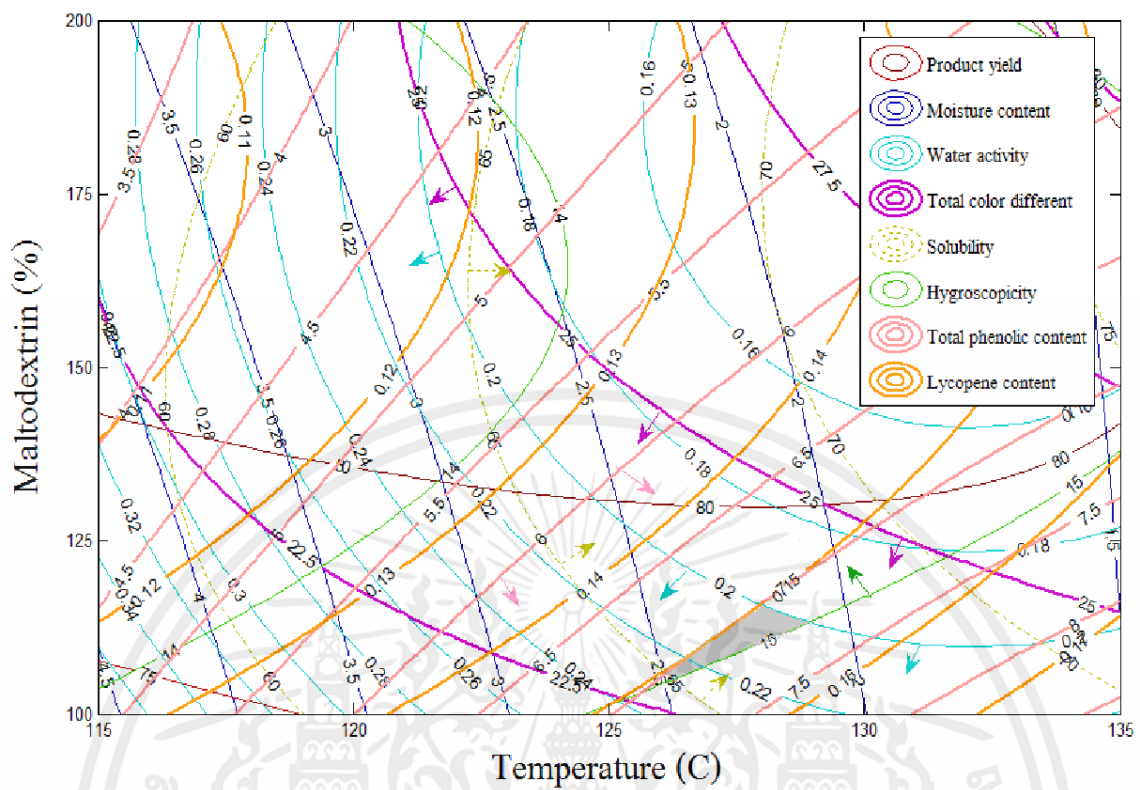
ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟักข้าวผงโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ วิธีการการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ใช้วิธี ซ้อนทับกราฟ (Superimposing graphical method) เพื่อหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดที่อยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนด โดยมีข้อกำหนดสมบัติทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เกณฑ์การพิจารณาสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟักข้าวผง

สมบัติทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผง	เกณฑ์การพิจารณา
ปริมาณผลผลิตผงที่ได้	$\geq 70\%$
ความชื้น (Kha <i>et al.</i> , 2014; kha <i>et al.</i> , 2010; Auisakchaiyoung, 2015)	$\leq 5\%$
วอเตอร์แอกทิวิตี (Chen and Mujumder, 2008)	0.2 - 0.5
ความแตกต่างสี (Mai <i>et al.</i> , 2013)	$\leq 25\%$
ความสามารถในการละลาย (Kha <i>et al.</i> , 2010; kha <i>et al.</i> , 2014)	$\geq 65\%$
การดูดกลับความชื้น (Bhusari <i>et al.</i> , 2014)	≤ 15 gความชื้น/100 g น้ำหนักฟักข้าวผง
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Trirattanapikul, 2014; Auisakchaiyoung, 2015)	≥ 6 mg GAE/g น้ำหนักฟักข้าวผง
ไลโคปีน (Warangkana and Visaka, 2015)	≥ 0.15 mg/100g น้ำหนักฟักข้าวผง

การสร้างกราฟสามารถสร้างได้โดยการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปรต่อค่าตัวแปรตาม จากนั้นจึงนำกราฟที่ได้มาทำการซ้อนทับกัน ในที่นี้ได้พลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการทำแห้งและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินต่อค่าสมบัติทางเคมีกายภาพ ทั้ง 8 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี การเปลี่ยนแปลงสี ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการดูดกลับความชื้น สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณไลโคปีน แสดงดังรูปที่ 4.13 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ การใช้อุณหภูมิการทำแห้งในช่วง 126-129 °C ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินในช่วง 105-116% ที่ระดับกัมมะธราบิกปริมาณ 10% จากสภาวะการผลิตนี้จะได้ค่าสมบัติทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผงประกอบด้วย ปริมาณผลผลิตที่ได้ อยู่ในช่วง 77.26-78.62% ความชื้นอยู่ในช่วง 2.08-2.51% วอเตอร์แอกทิวิตีอยู่ในช่วง 0.20-0.22 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีมีค่าอยู่ในช่วง 23.77- 23.81 ความสามารถในการละลายเท่ากับ 65.00-67.54% ค่าการดูดกลับความชื้น 14.86-15.00 g /100g สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 7.00-7.25 mgGAE/g และปริมาณไลโคปีนเท่ากับ 0.15 mg/100g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธี Superimposing graphical method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

- ฟักข้าวผงมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ดังนี้ ผลผลิตผงที่ได้มีค่า 76.69-88.63% ความชื้น 1.84-4.93% วอเตอร์แอกทิวิตี้ 0.19-0.40 การเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) 26.16-31.62 ความสามารถในการละลาย 57.57-76.28% การดูดกลับความชื้น 13.14-16.28 g/100g สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 3.42-8.51 mgGAE/g และปริมาณไลโคปีน 0.1172-0.1814 mg/100g
- ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง ปริมาณมอลโตเด็กซ์ทริน และปริมาณกัมอะราบิกต่อตัวแปรตอบสนองหรือสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟักข้าวผง แสดงในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์โพลิโนเมียลกำลังสอง ดังนี้
 - $Y_{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้}} = -155.89 + (2.885155X_1) + (0.804997X_2) - (1.85648X_3) - (0.01014X_1^2) - (0.00079X_2^2) - (0.02646X_3^2) - (0.00407X_1X_2) + (0.000222X_2X_3) + (0.023508X_1X_3)$
 - $Y_{\text{ความชื้น}} = 87.84399 - (1.13828X_1) - (0.06309X_2) - (0.18276X_3) + (0.003685X_1^2) + (0.00000117X_2^2) - (0.00163X_3^2) + (0.00046X_1X_2) + (0.00024X_2X_3) + (0.001667X_1X_3)$
 - $Y_{\text{วอเตอร์แอกทิวิตี้}} = 10.50235 - (0.1476X_1) - (0.00459X_2) - (0.04282X_3) + (0.000543X_1^2) + (0.0000106X_2^2) - (0.00011X_3^2) + (0.000005X_1X_2) + (0.0000212X_2X_3) + (0.00035X_1X_3)$
 - $Y_{\text{สี}} = 19.23729 - (0.06516X_1) - (0.20802X_2) + (0.886533X_3) - (0.000033X_1^2) - (0.00022X_2^2) - (0.00665X_3^2) + (0.00255X_1X_2) - (0.00016X_2X_3) - (0.00414X_1X_3)$
 - $Y_{\text{ความสามารถในการละลาย}} = -36.4979 + (0.989454X_1) - (0.22095X_2) + (1.312556X_3) - (0.00257X_1^2) - (0.00079X_2^2) + (0.007121X_3^2) + (0.003851X_1X_2) + (0.00052X_2X_3) - (0.01266X_1X_3)$
 - $Y_{\text{การดูดกลับความชื้น}} = -6.13 + (0.322169X_1) - (0.07497X_2) + (0.201646X_3) - (0.00091X_1^2) + (0.000232X_2^2) + (0.002595X_3^2) + (0.0000397X_1X_2) - (0.00064X_2X_3) - (0.00147X_1X_3)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต

เอกสารอ้างอิง

- กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. 2556. **แผนการป้องกันและควบคุมโรคมะเร็งแห่งชาติ (พ.ศ. 2556 - 2560)**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด
- ฉวีวรรณ สุจิตตร. 2558. “การเก็บข้อมูลองค์ประกอบผลผลิตฟักข้าวในงานทดลอง วิจัย ของส่วนการใช้น้ำชลประทาน” **วารสารข่าวเกษตรชลประทาน**. 72: 2-11.
- ณัฐยาพร หนั่นตะ, พัชริน ส่งศรี, พลัง สุริหาร, คมศร ลมโธสงและ กมล เลิศรัตน์. 2559. “การเปรียบเทียบสารพฤกษเคมีในฟักข้าว 13 สายพันธุ์ในสองฤดู” **แก่นเกษตร**. 44: 167-174.
- ธมนวรรณ ปั่นแก้ว, กนกกาญจน์ หนองขุนสาร และ ศศิธร ไบฝ่อง. 2559. “ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเยื่อฟักข้าวชนิดผง” **วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**.
- นฤดี พงศ์กิจวิฑูร, สุวิข ศิริวัฒน์โยธิน, สายลม สัมพันธ์เวชโสภา และ ทิพาพร อยู่วิทยา. 2544. “ปัจจัยการผลิตกล้วยหอมผงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุน” **วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี**. 24(1): 69-84
- ปาริชาติ ปาระทั่ง, พัชริน ส่งศรี, ปวันรัตน์ วิหังส์, พลัง สุริหาร และ กมล เลิศรัตน์. 2555. “การเจริญเติบโตและระยะพัฒนาการของผลฟักข้าว” **แก่นเกษตร**. 40: 504-513.
- มารีนา มะหนิ, นิตามณี ฉุ่นย่อง, ประชิต คงรัตน์ และ นิคม ชูศิริ. 2557. “ความชื้นสมดุลของฟักข้าว” **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ**. 17(3): 230-238.
- ยุทธนา บรรจง, มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันต์, เกษม หฤทัยธนาสันต์ และ วิชัย หฤทัยธนาสันต์. 2553. “สมรรถภาพการเจริญเติบโตและผลผลิตของฟักข้าวแหล่งพันธุ์ไทยและเวียดนามในการเก็บเกี่ยวปี แรก” **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร** 41(3/1)(พิเศษ): 1-4.
- ศุภกิจ ต้นวิบูลย์ศักดิ์. 2554. **มารู้จัก...แล้วมาปลูกฟักข้าวกันเถอะ** สำนักชลประทานที่ ๑๓. สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ ๕.
- สำนักโรคไม่ติดต่อ กรมควบคุมโรค. 2559. **รายงานประจำปี 2559**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกิจการโรง
 พิ ม พ
 องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2557. **การเพิ่มการบริโภคพืช ผัก ผลไม้**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์
 องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์
- Auisakchaiyoung, T. and Rojanakorn, T. 2015. “Effect of foam-mat drying conditions on quality of dried Gac fruit (*Momordica cochinchinensis*) aril.” **International food research journal**. 22(5): 2025-2031.

- Aguilera, J.M, Valle, J.M.D. and Karel, M. 1995. "Caking phenomena in amorphous food powders." **Trends in food science & technology**. 16: 149-155.
- Ajmera, S. (2006). "The effects of different cooling times and temperatures on tomato sauce lycopene content." Master of science thesis: Bowling green state university.
- Apinya, B and monthip, C. 2016. "Variation of lycopene and beta-carotene contents after harvesting of gac fruit and its prediction" **Agriculture and natural resources**. 5: 257-263.
- Arbex, A.K., Bizarro, V.R., Santos, J.C.S., Araujo, L.M.M., Jesus, A.L.C.D., Fernandes, M.S.A.F., Salles, M.M., Rocha, D.R.T.W. and Marcadenti, A. 2015. "The impact of the essential fatty acids (EFA) in human health". **Journal of endocrine and metabolic diseases**. 5: 98-104.
- Arocho, Y.D. Bellmer, D., Maness, N., Mcglynn, W. and Rayas-Duarte, P. 2012. "Watermelon pomace composition and the effect of drying and storage on lycopene content and color." **Journal of food quality**. 35: 331-340.
- Atalar, I. and Dervisoglu, M. 2015. "Optimization of spray drying process parameters for kefir powder using response surface methodology." **LWT-Food science and technology**. 60: 751-757
- Bas, D and Boyaci, I.H. 2007. "Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology." **Journal of food engineering**. 78: 836-845.
- Bazaria, B., Kumar and Pradyuman, K. 2016. "Effect of whey protein concentrate as drying aid and drying parameters on physicochemical and functional properties of spray dried beetroot juice concentrate." **Food bioscience**. 14: 21-27.
- Barbosa-Cánovas, G.V. 2002. **Unit operations in food engineering**. The united states of america : CRC press LLC.
- Barbosa-Canovas, G,V., Ortega-Rivas, E., Julino, P. and Yan, H. 2005. **Food powder physical properties, processing, and functionality**. New York: Plenum publishers
- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S. and Escaleira, L.A. 2008. "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry." **Talanta**. 76(5): 965-977.
- Bhandari, B.R. and Adhikari, B.P. 2008. **Drying technologies in food processing**. United kingdom: blackwell

- Bhusari, S.N., Mazaffer, K. and Kumar, p. 2014. "Effect of carrier agent on physical and microstructural of spray dried tamarind pulp powder" **Powder technology**. 266: 354-364.
- Caliskan, G. and Dirim, S.N. 2013. "The effect of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during of sumac extract." **Food and bioproducts processing**. 91: 539-548.
- Chaven, U.D. 2012. "Osmotic dehydration process for preservation of fruits and vegetables." **Journal of food research**. 1(2): 202-209.
- Chia, S.L and Chong, G.H. 2015. "Effect of drum drying on physiochemical characteristics of dragon fruit peel (*Hylocereus polyrhizus*)" **International journal of food engineering**. 11(2): 285-293
- Chonhenchob, V., Chinsirikul, W. and Singh, S.P. 2012. **Tropical and subtropical fruits: postharvest physiology, processing and packaging**. India: John wilev & Sons, Inc.
- Chua, K.J. and Chou, S.K. 2003. "Low-cost drying methods for developing countries." **Trends in food science and technology**. 14: 519-528.
- Chuyen, H.V., Nguyen, M.H, Roach, P.D., Golding, J.B. and Parks, S.E. 2015. "Gac fruit (*Momordica cochinchinensis* spreng.): a rich source of bioactive compounds and its potential health benefits" **International journal of food science and technology**. 50: 567-577.
- Chronakis, I.S. 1998. "On the molecular characteristics, compositional properties, and structural-functional mechanism of maltodextrin: a review." **Critical review in food science**. 38(7): 599-637.
- Du, J., Ge, Z., Xu, Z., Zou, B. and Zhang, Y., Li, C. 2014. "Comparison of the efficiency of five different drying carriers on the spray drying of persimmon pulp powder." **Drying technology**. 32: 1157-1166.
- Ekpong, A., Phomkong, W. and Onsaard, E. 2016. "The effects of maltodextrin as a drying aid and drying temperature on production of tamarind powder and consumer acceptance of the powder" **International food research journal**. 23(1): 300-308
- Eldahshan, O.A. and Singab, A.N.B. 2013. "Carotenoids" **Journal of pharmacognosy and phytochemistry**. 1(2): 225-234.

- Erbay, Z., Koca, N., Kaymark-Ertekin, F. and Ucuncu, M. 2015. "Optimization of spray drying process in cheese powder production." **Food and bioproducts processing**. 93: 156-165.
- Fabra, M.J., Marquez, E., Castro, D. and Chiralt, A. 2011. "Effect of maltodextrins in the water content-water activity-glass transition relationships of noni (*Morinda citrifolia* L.) pulp powder." **Journal of food engineering**. 103: 47-51.
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi, A and Omid, M. 2012. "Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder." **Food and bioproducts processing**. 90(4): 667-675.
- Fernandes, R.V.D.B., Borges, S.V. and Botrel, D.A. 2013. "Influence of spray drying operating condition on microencapsulated rosemary essential oil properties." **Cienc. Technol. Aliment.** 33: 171-178.
- Gabas, A.L., Telis, V.R.N., Sobral, P.J.A. and Telis-Romero, J. 2007. "Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder." **journal of food engineering**. 82: 246-252.
- Giada, M.D.L.R. 2013. "Food phenolic compounds: main classes, sources and their antioxidant power." [online]. Availabel. <http://dx.doi.org/10.5772/51687>.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. and Saurel, R. 2007. "Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview." **Food research international**. 40(9): 1107-1121.
- Henriquez, C., Cordova, A., Almonacid, S. and Saavedra, J. 2014. "Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-product" **Journal of food engineering**. 143: 146-153.
- Ho, C.T. 1992. **Phenolic compounds in food and their effects on health I**. Washington, DC: American Chemical Society.
- Ishida, B.K., Turner, C., Chapman, M.H. and Mckeeon, T.A. 2004. "fatty acid and carotenoid composition of gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng) fruit." **journal of agricultural and food chemistry**. 52: 274-279.
- Jaya, S. and Das, H. 2004. "Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties" **Journal of food engineering**. 63(2): 125-134.

- Jittanit, W., Chantara-In, M., Deying, T. and Ratanavong, W. 2011. "Production of tamarind powder by drum dryer using maltodextrin and Arabic gum as adjuncts" **Songklanakarin Journal of Science and Technology**. 33(1): 33-41.
- Kha, T.C., Nguyen, M.H., Roach, P.D. and Park, S.E. 2010. "Effects of spray drying conditions on the physiochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder" **Journal of food engineering**. 98: 385-392.
- Kha, T.C., Nguyen, M.H., Roach, P.D., Park, S.E. and Stathopoulos, C. 2013. "Gac Fruit: Nutrient and phytochemical composition and options for processing" **Food review international**. 29: 92-106.
- Kha, T.C., Nguyen, M.H., Roach, P.D. and Stathopoulos, C. 2014. "Microencapsulation of Gac oil: Optimisation of spray drying conditions using response surface methodology" **Powder technology**. 264: 298-309.
- Kubola, J. and Siriamornpun, S. 2011. "Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fraction (peel, pulp, aril and seed) of Thai Gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng)" **Food chemistry**. 127: 1138-1145.
- Kurozawa, L.E., Park, K.J. and Hubinger, D.H. 2009. "Effect of maltodextrin and gum Arabic on water sorption and glass transition temperature of spray dried chicken meat hydrolysate protein." **Journal of food engineering**. 91: 287-296.
- Loesecke, H.W.V. 2005. **Drying Dehydration of foods**. Jodhpur: Agrobios
- Lorenzo, J.M. and Munekata, P.E.S. 2016. "Phenolic compounds of green tea: Health benefits and technological application in food." **Asian pacific journal of tropical biomedicine**. 6(8): 709-719.
- Mai, H.C., Truong, V., Haut, B. and Debaste, F. 2013. "Impact of limited drying on *Momordica cochinchinensis* Spreng. Aril carotenoids content and antioxidant activity" **Journal of food engineering**. 118: 358-364.
- Marshall, K. 2004. "Therapeutic Applications of Whey Protein." **Alternative medicine review**. 9(2): 135-156.
- Minh, N.P. 2014. "Investigation the different ratios of carrier material to protect carotenoids in GAC (*Momordica cochinchinensis* Spreng) powder in drying

process” **International journal of multidisciplinary research and development**. 1(2): 71-76.

Mishra, P. Mishra, S. and Mahanta, C. L. 2014. “Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Emblica officinalis*) juice powder.” **Food and bioproducts processing**. 92: 252-258.

Montenegro, M.A., Boiero, M.L., Valle, L. and Borsarelli. 2012. **Products and application of biopolymers**. Croatia: Intech.

Nagata, M. and Yamashita, I. 1992. “Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit.” **Journal of the Japanese society for food science and technology**. 39(10): 925-928.

Nezzomo, M and Ferreira, S.R.S. 2016. “Carotenoids Functionality, Sources, and Processing by Supercritical Technology: A Review” **Journal of chemistry**. 2016: 1-16.

Nijhuis, H.H., Topping, H.M., Muresan, S. Yuksel, D. Leguijt, C. and Kloek, W. 1998. “Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables.” **Trends in food science and technology**, 9: 13-20.

Oberoi, D.P.S. and Sogi, D.S. 2015. “Effect of drying methods and maltodextrin concentration on pigment content of watermelon juice powder.” **Journal of food engineering**. 165: 172-178.

Oliveira, L.D.L.D., Carvalho, M.V.D. and Melo, L. 2014. “Health promoting and sensory properties of phenolic compounds in food.” **Ceres, viçosa**, 61: 764-7790.

Parra, R., Fernando, D., Cecilia, L.M., Clara, Z. M. and Jorge, C. 2016. “Influence of storage conditions on phenolic compounds stability, antioxidant capacity and colour of freeze-dried encapsulated red wine.” **Food Science and Technology**, 70: 162-170.

Patel, S. 1996. “Development of a process technology for production of tomato powder using foam-mat drying technique.” Doctor of philosophy, Department of agricultural and food engineering, Indian institute of technology.

Pereira, D.M. Valentao, P., Pereira, J.A. and Andrade, P.B. 2009. “Phenolic: from chemistry to biology.” **Molecules**. 14: 2202-2211.

- Pua, C.K., Hamid, N.S.A, Rusul, G. and Rahman, R.A. 2007. "Production of drum-dried jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder with different concentration of soy lecithin and gum Arabic." **Journal of food engineering**. 78: 630-636.
- Pua, C.K., Hamid, N. S. A., Tan, C.P., Mirhosseini, H., Rahman, R.B.A. and Rusul, G. 2010. "Optimization of drum drying processing parameters for production of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder using response surface methodology" **LWT- Food Science and Technology**. 43(2): 343-349.
- Phoungchandang, S. and Sertwasana, A. 2010. "Spray-drying of ginger juice and physicochemical properties of ginger powder." **Scienceasia**. 36: 40-45.
- Rao, A.V. and Rao, L.G. 2007. "Carotenoids and human health" **Pharmacological research**, 55:207-216.
- Ramli.W. and Daud, W. 2006. **Handbook of industrial drying**. 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press.
- Ratti, C. and Araya-Farias, M. 2009. **Advances in food dehydration**. New York: Taylor & Francis Group.
- saavedra-Lao, Z., Leyva-Porras, C., Araujo-Diaz, S. B., Toxqui-Teran, A. and Borrás-Enriquez, A. I.J. (2015). "Technological application of maltodextrins according to the degree of polymerization." **Molecules**. 20: 21067-21081.
- Sagar, V.R and Suresh, K.P. 2010. "Recent advances in drying and Dehydration of fruits and vegetable: a review" **Journal of food science and technology**. 47: 15-26.
- Santhalakshmy, S., Bosco, S.J.D. and Sebeena, S.F.M. 2015. "Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder." **Powder technology**. 274: 37-43.
- Šumic, Z., Vakula, A., Tepic, A., Čakarevic, J., Vitas, J. and Pavlic, B. 2016. "Modeling and optimization of rad currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM)." **Food chemistry**. 203: 465-475.
- Shi, Q., Fang, Z. and Bhandari, B. 2013. "Effect of Addition of Whey Protein Isolate on Spray-Drying Behavior of Honey with Maltodextrin as a Carrier Material." **Drying technology**. 31: 1681-1692.
- Tang, J., Feng, H. and Shen, G.Q. 2003. **Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering**. Inc. new York: Marcel dekker.

Tanon, R.V., Brabet, C. and Hubinger, M.D. 2008. "Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying." **Journal of food engineering**. 88: 411-418.

Technical Evaluation Report. 2012. "**β**-Carotene." 1. the Technical Services Branch for the USDA National Organic Program.

Teouo, E, Fitzpatrick, J.J. and Synnott, E.C. 1999. "Characterisation of food powder flowability." **Journal of food engineering**. 39: 31-37.

Thankitsunthorn, S., Thawornphiphatdit, C., Laohaprasit, N. and Szrednicki, G. 2009. "Effects of drying temperature on quality of dried indian gooseberry powder." **International food research journal**. 16: 355-361.

Trirattanapikul, W. and Phoungchandang, S. 2016. "Influence of Different Drying Methods on Drying Characteristics, Carotenoids, Chemical and Physical Properties of Gac Fruit Pulp (*Momordica cochinchinensis* L.)." **International journal of food engineering** 12(4): 395-409.

Vidović, S.S., Vladić, J. Z., Vaštag, Ž.G, Zeković, Z.P. and Popović, L.M. 2014. "Maltodextrin as a carrier of health benefit compounds in *Satureja montana* dry powder extract obtained by spray drying technique." **Powder technology**. 258: 209-215.

Warangkana, A. and Visaka, A. 2015. "Effect of spray drying conditions on characteristics, Nutritional value and antioxidant activity of gac fruit aril powder." **Review of integrative business & economics research**. 4: 1-11.

Wilhelm, L.R., Suter, D.A. and Brusewitz, G.H. 2004. **Food and process engineering technology**. St.Joseph, Michigan: ASAE.

Yang, J., Gadi, R., Paulino, R. and Thomson, T. 2010. "Total phenolics, ascorbic acid, and antioxidant capacity of noni (*Morinda citrifolia* L.) juice and powder as affected by illumination during storage." **Food chemistry**. 122(3): 627-632.

Zhang, L., Zeng, X., Fu, N., Sun, Y. and Lin, L. 2018. "Maltodextrin: A consummate carrier for spray-drying of xylooligosaccharides" **Food research international**. 106: 383-393.

Zhong, K. and Wang, Q. 2010. "Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from dried longan pulp using response surface methodology." **Carbohydrate polymers**. 80: 19-25.



ภาคผนวก ก

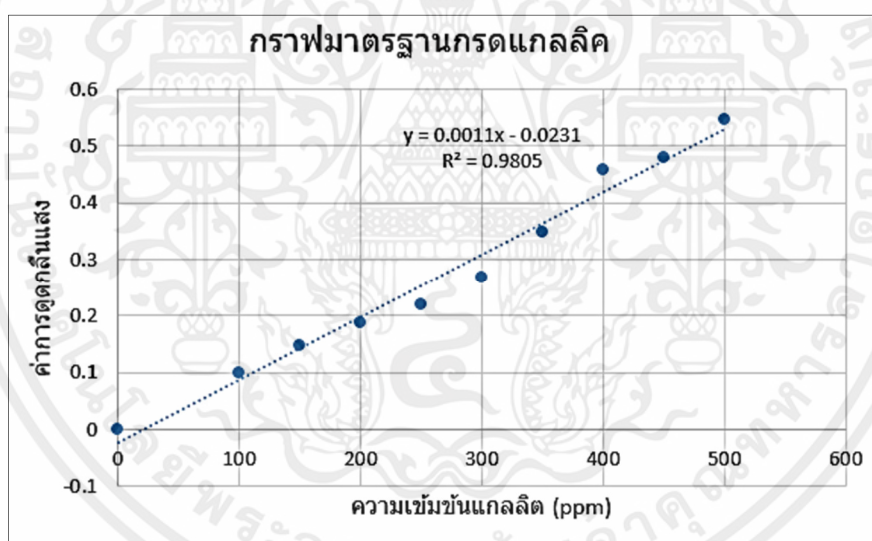
การเตรียมกราฟมาตรฐานของกรดเกลือและการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกและการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การเตรียมกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกความเข้มข้น 1000 ppm โดยละลายกรดแกลลิก 0.1 g ในน้ำกลั่น 100 ml
2. นำสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกความเข้มข้น 1000 ppm มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 6 ระดับในหลอดทดลอง ได้แก่ 100 200 300 400 500 และ 600 ppm
3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกทุกความเข้มข้น 0.1 ml ปรับปริมาตรโดยการเติมน้ำกลั่น 7.9 ml
4. เติมน้ำละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้นละ 0.5 ml
5. เติมน้ำละลายโซเดียมคาร์โบเนตความเข้มข้น 20% ปริมาตร 1.5 ml
6. นำหลอดทดลองไปต้มที่อุณหภูมิ 40°C นาน 30 นาที
7. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm
8. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 nm กับความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก ดังรูป



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก

จากกราฟมาตรฐาน $y = 0.0011X - 0.231$ สามารถคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดได้โดยการแทนค่าการดูดกลืนแสงในตัวแปร y แล้วคำนวณหาค่า x ซึ่งเป็นตัวแปรของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลผลิตผงที่ได้

Regression Statistics table

Multiple R	0.816567
R Square	0.666782
Adjusted R Square	0.066991
Standard Error	4.421725
Observations	15

ANOVA table

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	195.6184	21.73538	1.11169	0.479167
Residual	5	97.75824	19.55165		
Total	14	293.3766			

<i>Factor</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	-155.89	375.3634	-0.4153	0.69514
temperature	2.885155	5.809914	0.496592	0.640536
Maltodextrin	0.804997	0.624935	1.288128	0.25409
Gum arabic	-1.85648	2.99148	-0.62059	0.562059
Temp^2	-0.01014	0.023011	-0.44047	0.677985
Maltodextrin^2	-0.00079	0.00092	-0.86221	0.427977
Gum arabic^2	-0.02646	0.023011	-1.14977	0.302245
Temperature*maltodextrin	-0.00407	0.004422	-0.91983	0.399863
Maltodextrin*Gum arabic	0.000222	0.004422	0.050276	0.961849
Temperature*Gum arabic	0.023508	0.022109	1.063305	0.336277

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความชื้น

Regression Statistics table

Multiple R	0.973493
R Square	0.947689
Adjusted R Square	0.85353
Standard Error	0.35736
Observations	15

ANOVA table

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	11.56798	1.285331	10.06477	0.010208
Residual	5	0.63853	0.127706		
Total	14	12.20651			

Factor	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	87.84399	30.33652	2.895652	0.033962
Temperature	-1.13828	0.469552	-2.42419	0.059808
Maltodextrin	-0.06309	0.050507	-1.24919	0.266887
Gum arabic	-0.18276	0.241769	-0.75594	0.483758
temperature^2	0.003685	0.00186	1.981312	0.104403
Maltodextrin^2	1.17E-06	7.44E-05	0.01578	0.98802
Gum arabic^2	-0.00163	0.00186	-0.87452	0.421846
Temperature*Maltodextrin	0.00046	0.000357	1.287174	0.254396
Maltodextrin*Gum arabic	0.00024	0.000357	0.670484	0.532268
Temperature*Gum arabic	0.001667	0.001787	0.932683	0.393796

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Water activity

Multiple R	0.892
R Square	0.795664
Adjusted R Square	0.427861
Standard Error	0.042764
Observations	15

ANOVA table

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	0.035605	0.003956	2.163284	0.204717
Residual	5	0.009144	0.001829		
Total	14	0.044749			

<i>Factor</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	10.78886	3.630273	2.971915	0.031088
temperature	-0.15236	0.05619	-2.71157	0.042197
Maltodextrin	-0.00484	0.006044	-0.80011	0.459957
Gum arabic	-0.04073	0.028932	-1.40777	0.218227
Temperature^2	0.000563	0.000223	2.529379	0.05257
Maltodextrin^2	1.13E-05	8.9E-06	1.263753	0.262034
Gum arabic^2	-0.00013	0.000223	-0.56354	0.597402
Temperature*Maltodextrin	5.5E-06	4.28E-05	0.128613	0.902677
Maltodextrin*Gum arabic	2.12E-05	4.28E-05	0.494964	0.641607
Temperature*Gum arabic	0.000339	0.000214	1.586222	0.173548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ลี

Multiple R	0.901873
R Square	0.813375
Adjusted R Square	0.477449
Standard Error	2.036691
Observations	15

ANOVA table

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	90.39412	10.04379	2.421294	0.171442
Residual	5	20.74055	4.14811		
Total	14	111.1347			

Factor	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	19.23729	172.8961	0.111265	0.915735
temperature	-0.06516	2.676105	-0.02435	0.981517
Maltodextrin	-0.20802	0.287852	-0.72268	0.502254
Gum arabic	0.886533	1.377906	0.643392	0.548313
Temperature^2	-3.3E-05	0.010599	-0.00314	0.997619
Maltodextrin^2	-0.00022	0.000424	-0.51756	0.62684
Gum arabic^2	-0.00665	0.010599	-0.62757	0.557826
Temperature*Maltodextrin	0.00255	0.002037	1.252118	0.265906
Maltodextrin*Gum arabic	-0.00016	0.002037	-0.08039	0.939046
Temperature*Gum arabic	-0.00414	0.010183	-0.40635	0.701291

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความสามารถในการละลาย

Multiple R	0.99417
R Square	0.988374
Adjusted R Square	0.967449
Standard Error	1.003286
Observations	15

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	427.8871	47.54301	47.23207	0.000264
Residual	5	5.032916	1.006583		
Total	14	432.92			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	-36.4979	85.16969	-0.42853	0.686098
Temperature	0.989454	1.318266	0.750573	0.486709
Maltodextrin	-0.22095	0.141797	-1.55818	0.179928
Gum Arabic	1.312556	0.678765	1.933743	0.110957
Temperature^2	-0.00257	0.005221	-0.49244	0.64327
Maltodextrin^2	-0.00079	0.000209	-3.79283	0.012721
Gum arabic^2	0.007121	0.005221	1.363788	0.230822
Temperature*Maltodextrin	0.003851	0.001003	3.837964	0.012149
Maltodextrin*Gum arabic	0.00052	0.001003	0.517897	0.626622
Temperature*Gum arabic	-0.01266	0.005016	-2.52409	0.05291

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การดูกลับความขึ้น

Multiple R	0.989647
R Square	0.979401
Adjusted R Square	0.942322
Standard Error	0.206469
Observations	15

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	10.1341	1.126011	26.41389	0.001077
Residual	5	0.213148	0.04263		
Total	14	10.34725			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	-6.13731	17.52731	-0.35016	0.740489
temperature	0.322169	0.27129	1.187545	0.288347
Maltodextrin	-0.07497	0.029181	-2.56916	0.050087
Gum arabic	0.201646	0.139685	1.443581	0.208455
Temperature^2	-0.00091	0.001074	-0.848	0.435144
Maltodextrin^2	0.000232	4.3E-05	5.387234	0.002973
Gum arabic^2	0.002595	0.001074	2.414741	0.060509
Temperature*Maltodextrin	3.97E-05	0.000206	0.192208	0.855142
Maltodextrin*Gum arabic	-0.00064	0.000206	-3.11463	0.026412
Temperature*Gum arabic	-0.00147	0.001032	-1.42266	0.214111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

<i>Regression Statistics table</i>	
Multiple R	0.900212
R Square	0.810382
Adjusted R Square	0.46907
Standard Error	0.993938
Observations	15

<i>ANOVA table</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	21.11052	2.345613	2.374314	0.176924
Residual	5	4.93956	0.987912		
Total	14	26.05008			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	-62.9691	84.37608	-0.74629	0.489072
temperature	0.904821	1.305982	0.692828	0.519274
Maltodextrin	0.017969	0.140476	0.127917	0.9032
Gum arabic	0.51363	0.67244	0.76383	0.479441
Temperature^2	-0.00248	0.005173	-0.47862	0.652405
Maltodextrin^2	9.74E-05	0.000207	0.470525	0.657791
Gum arabic^2	-0.00034	0.005173	-0.06643	0.949608
Temperature*Maltodextrin	-0.00057	0.000994	-0.57217	0.59197
Maltodextrin*Gum arabic	0.000149	0.000994	0.15003	0.886605
Temperature*Gum arabic	-0.00423	0.00497	-0.85064	0.433806

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ปริมาณไลโคปีน

Multiple R	0.782752
R Square	0.612701
Adjusted R Square	-0.08444
Standard Error	0.02003
Observations	15

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	0.003173	0.000353	0.878879	0.592946
Residual	5	0.002006	0.000401		
Total	14	0.005179			

Factor	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value
Intercept	0.006528	1.700346	0.003839	0.997085
temperature	-9E-05	0.026318	-0.00344	0.99739
Maltodextrin	-0.00101	0.002831	-0.35534	0.736837
Gum arabic	0.015816	0.013551	1.167124	0.295789
Temperature^2	1.66E-05	0.000104	0.159112	0.879808
Maltodextrin^2	3.53E-06	4.17E-06	0.847389	0.435452
Gum arabic^2	2.69E-05	0.000104	0.258299	0.806471
Temperature*Maltodextrin	-2.1E-06	2E-05	-0.10361	0.921509
Maltodextrin*Gum arabic	-1.7E-06	2E-05	-0.08608	0.934744
Temperature*Gum arabic	-0.00013	0.0001	-1.31407	0.245879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

