



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดัดแปรข้าวเพื่อเป็นข้าวดัชนีน้ำตาลต่ำ และการประยุกต์ใช้ในอาหารพร้อม
รับประทานสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน

Rice modification to be low glycemic index (GI) rice and its application to
ready-to-eat meal for diabetes patients.

ผศ.ดร.นภสรพี เหลืองสกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การตัดแปรข้าวเพื่อเป็นข้าวดัชนีน้ำตาลต่ำ และการประยุกต์ใช้ในอาหารพร้อมรับประทานสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดินปีงบประมาณ 2560

ประจำปีงบประมาณ 2560 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 550,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.นภัทรพี เหลืองสกุล (หัวหน้าโครงการ) คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปัจจุบันแนวโน้มของผู้บริโภคที่หันมาสนใจเรื่องสุขภาพมีเพิ่มมากขึ้น อาหารเพื่อสุขภาพในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตที่น่าสนใจในปัจจุบันคือ อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ต่ำ และอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) สูง ซึ่งหากบริโภคเป็นประจำจะสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคต่าง ๆ ได้ เช่น โรคเบาหวาน โรคอ้วน หรือโรคมะเร็ง เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของปริมาณอะมิโลส และวิธีการตัดแปรต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility) ของฟลาวัวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 4.58 – 37.74 โดยฟลาวัวร์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลส แตกต่างกันจะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง ซึ่งประกอบด้วยการศึกษาหาปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS)) สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch; SDS) และสตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch; RDS) และมีการวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาวัวร์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าปริมาณอะมิโลสมีผลต่อปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ และค่าดัชนีน้ำตาล โดยฟลาวัวร์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง และมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาการตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat-moisture treatment, HMT) และวิธีการแอนนิลลิง (annealing, ANN) ซึ่งในการตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะศึกษาผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาวัวร์ข้าวที่ แตกต่างกัน 3 ระดับคือ ร้อยละ 20 25 และ 30 โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณความชื้นในขั้นตอนการตัดแปรจะส่งผลให้ฟลาวัวร์ข้าวมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มมากขึ้น และมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง ในขณะที่การตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีการแอนนิลลิงจะเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการตัดแปร แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 45 50 และ 55 องศาเซลเซียส โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการตัดแปรจะส่งผลให้ฟลาวัวร์ข้าวมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มมากขึ้น และมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการตัดแปรทั้ง 2 วิธีพบว่าการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะสามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาวัวร์ข้าวได้มากกว่าการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดแปรด้วยวิธีแอนนิลลิง ดังนั้นจึงนำฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณความชื้นในการตัดแปรจะส่งผลให้ค่า T_g , T_p , T_c และ ΔH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านความหนืด การตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุด และค่าการแตกสลายของเม็ดแป้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม การตัดแปรโดยให้ความชื้นเริ่มต้นของฟลาวัวร์ข้าวมีค่าเท่ากับร้อยละ 30 จะส่งผลให้ฟลาวัวร์ข้าวสามารถละลายได้ดีขึ้น ซึ่งเมื่อส่องคุณลักษณะของเม็ดแป้งที่ผ่านการตัดแปรจะพบว่าเม็ดแป้งมีลักษณะบวม พอง และความเป็นเหลี่ยมมุมจะหายไป นอกจากนี้ได้มีการนำฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น โดยให้ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 30 มาทดแทนแป้งข้าวปกติในขนมซ่ม่วง เพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวตัดแปรในการทำขนมซ่ม่วงที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงคือ 60:40 โดยสามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลลงร้อยละ 8.96 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมซ่ม่วงสูตรปกติ

Research Title: Rice modification to be low glycemic index (GI) rice and its application to ready-to-eat meal for diabetes patients.

Researcher: Asst. Prof. Dr.Naphatrapi Luangsakul

Faculty: Agro – industry

Department: Food science

ABSTRACT

Nowadays, the healthy trend of consumers has dramatically increase over the past. There are two interesting about healthy food, which are low glycemic index (GI) and high resistant starch (RS) food. These are helpful for reducing the risk of diabetes, obesity and cancer. The objective of this research was to study the effects of amylose content and modified method on in vitro digestibility of rice flours, which have amylose content ranging in 4.58 – 37.74%. Rice flours were analyzed resistant starch (RS), slowly digestible starch (SDS), rapidly digestible starch (RDS) content and glycemic index value (GI). Amylose content affected starch fractions and GI. High amylose rice flour has higher RS and lower GI as compared with low amylose rice flour. Moreover, this research was to study the modification of rice flours by heat-moisture treatment (HMT) and annealing (ANN) method. The variation of moisture content of rice flour was studied, which were 20, 25 and 30%. The increase in moisture content that caused higher RS content and lower GI. For annealing method, modified temperature was varied, which were 45, 50 and 55°C. Higher modified temperature resulted in higher RS content as well as lower GI value. However, heat-moisture treatment could increase RS content and decrease GI value of rice flour more than annealing method. Therefore, heat-moisture treated rice flour was selected for analyzing the physicochemical properties. The increase in moisture content resulted in increase T_o , T_p , T_c and ΔH . Furthermore, rice flour that modified by heat-moisture treatment showed lower peak viscosity (PV) and breakdown (BD) as compared with native rice flour. The HMT with 30% of moisture content that led to increase solubility of rice flour. The starch granule of heat-moisture treated rice showed the loss of physical integrity with distention of the surface. In addition, heat-moisture treated rice flour was added in steamed thai dumplings (Chormuang) for lowering GI of this product. The optimized ratio of native rice flour to heat-moisture treated rice flour that was 60:40, which could reduce GI value 8.96% as compared with control.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากแหล่งเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี
งบประมาณ พ.ศ.2560

ผศ.ดร.นภัสรพี เหลืองสกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	IIIX
สารบัญภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้าว	4
2.1.1 ข้าวเหนียว	4
2.1.2 ข้าวเจ้า	5
2.2 แป้งและคุณสมบัติทั่วไปของแป้ง	6
2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของแป้ง	6
2.2.2 การเกิดเจลลิตไนเซชัน (gelatinization)	9
2.2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)	10
2.2.4 สมบัติทางความร้อนของแป้ง	11
2.2.5 พฤติกรรมทางความหนืด	12
2.2.6 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย	13
2.3 ประเภทพลาวัร์ข้าวที่แบ่งตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย	15
2.3.1 สตาร์ชที่ย่อยเร็ว (rapidly digestible starch; RDS)	15
2.3.2 สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch; SDS)	16
2.3.3 สตาร์ชทนย่อย (resistant starch; RS)	16
2.3.4 ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)	17
2.4 การคัดแปรแป้ง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การดัดแปรทางเคมี (chemical modification)	19
2.4.2 การดัดแปรทางเอนไซม์ (enzymatic modification)	19
2.4.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnology modification)	19
2.4.4 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)	19
2.5 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวเพื่อให้มีปริมาณสารขมย้อยสูงหรือมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ	20
2.5.1 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น (heat-moisture treatment; HMT)	20
2.5.2 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิง (annealing; ANN)	20
2.6 ขนมห่อม่วง	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการดัดแปรทางกายภาพ	22
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	24
3.1 วัตถุประสงค์	24
3.2 เครื่องมือ	24
3.3 สารเคมี	25
3.4 การเตรียมฟลาวัวร์ข้าว	26
3.5 การศึกษาผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาวัวร์ข้าวตั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)	26
3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส	26
3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)	26
3.5.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)	28
3.5.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	29
3.6 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวโดยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นเพื่อเพิ่มปริมาณสารขมย้อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล	29
3.6.1 การวิเคราะห์สมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)	30
3.6.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)	30
3.6.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ	30
3.7 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวโดยวิธีการแอนนิลลิงเพื่อเพิ่มปริมาณสารขมย้อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)	30
3.7.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)	30
3.7.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	30
3.8 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร	31
3.8.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties)	31
3.8.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด (pasting properties)	31
3.8.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวของฟลาวร์ข้าว	32
3.8.4 การส่องกล้องจุลทรรศน์ของเม็ดฟลาวร์โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	32
3.8.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ	32
3.9 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวร์ข้าวดัดแปรในการทำขนมขอม่วงที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง	32
3.9.1 การเตรียมโดก่อนนึ่งและหลังนึ่ง	32
3.9.2 วิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส	33
3.9.3 วิเคราะห์คุณภาพด้านสี	33
3.9.4 วิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส	33
3.9.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)	33
3.9.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	35
4.1 ผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาวร์ข้าวดั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)	35
4.2 ผลของการดัดแปรฟลาวร์ข้าวโดยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้นเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล	36
4.3 ผลของการดัดแปรฟลาวร์ข้าวโดยวิธีการแอนนิลลิ่งเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล	38
4.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร	40
4.4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร	40
4.4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร	43
4.4.3 ผลของการวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวของฟลาวร์ข้าว	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการส่องดูลักษณะของเม็ดฟลาวัวร์โดยการใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
4.5 ผลของการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวัวร์ข้าวคั่วเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวคั่วดัดแปรในการทำขนมขบ่มที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง	51
4.5.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส โดก่อนนึ่งและหลังนึ่งของขนมขบ่มที่ทำทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร	51
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสี โดของขนมขบ่มที่ทำทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร	53
4.5.3 ผลการศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมขบ่มที่ทำทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร	53
4.5.4 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขบ่มในสูตรทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการทดลอง	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	65
ภาคผนวก ข ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	66
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ทางเคมี	67
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจัดแบ่งข้าวตามปริมาณอะมิโลส	4
2.2 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ	8
4.1 ผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาวร์ข้าวต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (in vitro digestibility)	35
4.2 ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาวร์ข้าวในการคัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง	37
4.3 ผลของอุณหภูมิในการคัดแปรฟลาวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิงต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง	39
4.4 สมบัติทางความร้อนของฟลาวร์ข้าวคั้งเดิมและฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น	41
4.5 สมบัติทางความหนืดของฟลาวร์ข้าวคั้งเดิมและฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น	44
4.6 ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวของฟลาวร์ข้าวต่าง ๆ	47
4.7 ลักษณะของเม็ดแป้งที่ไม่ผ่านและผ่านการคัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น	49
4.8 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งของขนมขม่อม่วงที่ทดแทนด้วยฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร	51
4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งที่ทดแทนด้วยฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร	53
4.10 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขม่อม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร	54
4.11 ผลการทดสอบคุณภาพประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของขนมขม่อม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรโดยใช้การทดสอบความพืด	55
4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลของขม่อม่วงที่ทดแทนและไม่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน	6
2.2 ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพคติน	7
2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B	9
2.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ของสตาร์ชที่มีลักษณะ	9
2.5 การเจลาตีไนเซชันของแป้ง	10
2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง	11
2.7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	13
2.8 ขนมห่อม่วง	21
3.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ขนมห่อม่วง	34
4.1 โดก่อนึ่งขนมห่อม่วงที่ทดแทนแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนของ แป้งข้าวปกติต่อแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนที่ต่างกัน	52
4.2 โดหลังนึ่งขนมห่อม่วงที่ทดแทนแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนของแป้ง ข้าวปกติต่อแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนที่ต่างกัน	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการย่อยสลายอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต อัตราการย่อย และการดูดซึมของแป้ง จัดเป็นตัวกำหนดการตอบสนองต่อการเผาผลาญอาหาร ซึ่งแสดงจากการตอบสนองต่อระดับน้ำตาลในเลือดของร่างกายภายหลังการรับประทานอาหาร อย่างไรก็ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ในคนมีข้อจำกัดหลายประการ เนื่องจากมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีการศึกษาโดยการจำลองจากสภาวะจริงของระบบการย่อยในกระเพาะ และลำไส้ของมนุษย์ แล้วทำการวัดปริมาณกลูโคสที่ปล่อยออกมาในแต่ละช่วงเวลา (*in vitro* digestion) (Goñi และคณะ 1997) โดยสามารถแบ่งส่วนต่าง ๆ ของแป้งในเชิงคุณค่าทางอาหารของสตาร์ช (nutritional starch) ออกเป็น 3 ประเภทตามอัตราและเวลาในการย่อย (Englyst และคณะ 1992) ได้แก่ สตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch; RDS) สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch; SDS) และสตาร์ชทนย่อย (resistant starch; RS) โดยการบริโภคอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูงเป็นประจำ จะสามารถลดความเสี่ยงต่อโรคต่าง ๆ ได้ เช่น โรคเบาหวาน โรคอ้วน และโรคมะเร็ง เป็นต้น

ข้าวจัดเป็นธัญญาหารที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการมากมายที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยข้าวจัดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่คนนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศแถบเอเชีย ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index; GI) เป็นดัชนีที่ชี้วัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยสามารถแบ่งอาหารตามค่าดัชนีน้ำตาลออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง ($GI > 70$) อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลปานกลาง ($GI = 56 - 69$) และอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ($GI < 55$) (Jenkins และคณะ 1981) โดยข้าวเป็นธัญญาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลหลากหลายช่วง อย่างไรก็ตามข้าวที่คนไทยนิยมบริโภคเช่น ข้าวหอมมะลิ จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง

โดยทั่วไปข้าวจะมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันตามสายพันธุ์ของข้าว เช่น ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิ ข้าวเสาไห้ เป็นต้น ซึ่งปริมาณอะมิโลสนั้นจะส่งผลต่ออัตราการย่อยในหลอดทดลอง และค่าดัชนีน้ำตาลที่มีความแตกต่างกัน โดยค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวนั้นจะมีค่าลดลงตามปริมาณอะมิโลสที่เพิ่มสูงขึ้นในข้าวแต่ละสายพันธุ์ (Frei และคณะ 2003) ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวอยู่ในภูมิภาคต่าง ๆ ซึ่งมีความแตกต่างของแหล่งเพาะปลูก ทำให้มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกันตามแต่ละพื้นที่เพาะปลูก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันของข้าวแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้มีการศึกษาการคัด

แปรพลาวัลข้าวเพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาล โดยวิธีการคัดแปรที่ศึกษาประกอบด้วยวิธีการให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับความร้อนชื้น (heat moisture treatment; HMT) และการแอนนีลลิ่ง (annealing; ANN) จากนั้นจะทำการเลือกวิธีการตัดแปรที่ส่งผลให้ฟลาวร์ข้าวมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุด มาตัดแปรฟลาวร์ข้าวและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการทดแทนแป้งข้าวคังเดิมด้วยแป้งตัดแปรในผลิตภัณฑ์ขนมขบ่ม่วง เพื่อลดค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขบ่ม่วง ซึ่งจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งให้กับผู้บริโภคที่สนใจบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาวร์ข้าวตั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat moisture treatment; HMT) และผลของอุณหภูมิการตัดแปรด้วยวิธีแอนนีลลิ่ง (annealing; ANN) ที่มีต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปร

1.2.4 เพื่อศึกษาศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวร์ข้าวตั้งเดิมต่อฟลาวร์ข้าวตัดแปรในการทำขนมขบ่ม่วงที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะครอบคลุมเนื้อหาทางสมบัติการย่อยในหลอดทดลองของฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างกันในด้านปริมาณอะมิโลส การศึกษาการตัดแปรฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น โดยมีการแปรปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาวร์ข้าวก่อนการให้ความร้อน และศึกษาการตัดแปรฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีการแอนนีลลิ่ง โดยมีการแปรอุณหภูมิการให้ความร้อน ซึ่งจะมีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพการย่อยในหลอดทดลองของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปร หลังจากนั้นเลือกวิธีการตัดแปรที่ส่งผลให้ฟลาวร์ข้าวมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุดมาศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปร ในขั้นตอนสุดท้ายนำฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปร และมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุดมาศึกษาการทดแทนบางส่วนของฟลาวร์ข้าวตั้งเดิมด้วยฟลาวร์ข้าวตัดแปรในผลิตภัณฑ์ขนมขบ่ม่วง โดยมีการหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดแทนเพื่อให้ได้ขนมขบ่ม่วงที่มีลักษณะที่ดี และมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันของฟลาวร์ข้าวตั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 ทราบถึงผลของการดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat moisture treatment; HMT) และวิธีการแอนนิลลิง (annealing; ANN) ต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง

1.4.3 ทราบถึงสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร

1.4.4 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดแทนบางส่วนด้วยฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปรในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และทราบค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขบเคี้ยวที่มีการทดแทนบางส่วนด้วยฟลาวัวร์ข้าวดัดแปร รวมทั้งคุณภาพของขนมขบเคี้ยวที่ถูกทดแทนด้วยฟลาวัวร์ข้าวดัดแปร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า (Gramineae หรือ Poaceae) อยู่ในสกุล *Oryza* สามารถเจริญได้ดีทั้งในเขตร้อนและอบอุ่น สามารถแบ่งข้าวตามพื้นที่การเพาะปลูกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ *Oryza sativa* มีแหล่งกำเนิดและปลูกมากในทวีปเอเชีย *Oryza glaberrima* มีแหล่งกำเนิดและปลูกเฉพาะในแอฟริกา และ wild rice หรือ ข้าวป่า มักจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในพื้นที่ต่าง ๆ เช่น *Oryza perennis* และ *Oryza officinalis* เป็นต้น โดยข้าวที่ปลูกมากที่สุดในโลก คือ *Oryza sativa* หรือข้าวสายพันธุ์เอเชีย คิดเป็นร้อยละ 90 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด

การจำแนกชนิดข้าวตามคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าว สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ข้าวเจ้า (non-glutinous rice, non-sticky rice, non-waxy rice) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* และข้าวเหนียว (glutinous rice, sticky rice, waxy rice) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza glutinosa* โดยสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute, IRRI) ได้จำแนกชนิดของข้าวออกเป็นกลุ่มตามปริมาณของอะมิโลสโดยแบ่งออกเป็นข้าวเหนียว 1 กลุ่ม และข้าวเจ้า 4 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (งามชื่น, 2530)

ตารางที่ 2.1 การจัดแบ่งข้าวตามปริมาณอะมิโลส

ตารางที่ 0.1 ประเภทข้าว	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	0-5	เหนียวมาก
ข้าวเจ้าอะมิโลสต่ำมาก	5.1-12.0	นุ่ม-เหนียว
ข้าวเจ้าอะมิโลสต่ำ	12.1-20.0	นุ่ม-เหนียว
ข้าวเจ้าอะมิโลสปานกลาง	20.1-25	นุ่ม-เหนียว
ข้าวเจ้าอะมิโลสสูง	>25	ร่วนแข็ง

ที่มา: Juliano (1993)

2.1.1 ข้าวเหนียว

ข้าวเหนียว (glutinous rice หรือ waxy rice) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Oryza sativa* var. *glutinosa* ประกอบด้วยอะมิโลเพคตินประมาณร้อยละ 95 และมีน้ำหนักรวมของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 0-5 ข้าวสารของข้าวเหนียวจะมีสีขาวขุ่น มีการดูดน้ำและขยายตัวน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเจ้า เมื่อนึ่งแล้วจะได้ข้าวสุกที่เหนียวจับติดกันแน่น และมีลักษณะใส เป็นข้าวที่มีลักษณะเด่นคือ การติดกันเหมือนกาวของเมล็ดข้าวที่สุกแล้วปลูกมากทางภาคเหนือ อีสานของประเทศไทยและประเทศลาว ข้าวเหนียวเป็นที่นิยมบริโภคอย่างกว้างขวางในรูปของข้าวเหนียวเป็นเมล็ด และเป็นอาหารหลักของประชากรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ นอกจากการบริโภคโดยตรงแล้วยังมีการนำข้าวเหนียวมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสุราพื้นเมือง การผลิตแป้งข้าวเหนียว เพื่ออุตสาหกรรมอาหารและขนมขบเคี้ยว

2.1.2 ข้าวเจ้า

2.1.2.1 ข้าวหอมมะลิ (Thai Hom Mali Rice, Jasmine Rice) พบว่ามีน้ำหนักรวมของอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบร้อยละ 9-20 เป็นสายพันธุ์ข้าวที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย เป็นข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสง พันธุ์ข้าวจะออกดอกในช่วงฤดูหนาวทำให้สามารถปลูกได้เฉพาะนาปีเท่านั้น ลักษณะข้าวเปลือกเรียวยาว เมื่อสีเป็นข้าวสารจะได้ข้าวเมล็ดที่มีลักษณะเรียวยาว ขาวใส เป็นเงา มีกลิ่นหอมคล้ายใบเตย ซึ่งความหอมของข้าวหอมมะลิเกิดจากสารระเหย คือ 2-acetyl-1-pyrroline ซึ่งเป็นสารที่สามารถระเหยหายไปได้ การรักษาความหอมของข้าวหอมมะลิที่ดีต้องเริ่มตั้งแต่การเก็บเกี่ยว การเก็บรักษาข้าวเปลือกก่อนการสีข้าว และการเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการสีเรียบร้อยแล้ว โดยการรักษาความหอมของข้าวเอาไว้สามารถทำได้โดยการเก็บรักษาโดยหลีกเลี่ยงภาวะแวดล้อมที่ร้อนอบอ้าว มีความชื้นสูง ในบริเวณที่มีแสงแดด หรือใกล้สถานที่ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษา คือ ที่ที่มีอากาศค่อนข้างเย็น มีการถ่ายเทของอากาศดี ความชื้นไม่สูง ลักษณะเด่นของข้าวหอมมะลิ คือ เมื่อบึ่งหรือหุงสุก เมล็ดข้าวจะมีความนุ่มมากกว่าข้าวเจ้าทั่วไป มีความร่วนน้อย และมีกลิ่นหอม จึงเป็นพันธุ์ข้าวที่นิยมบริโภคอย่างแพร่หลายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ และยังเป็นพันธุ์ข้าวที่สร้างชื่อเสียงให้ข้าวไทยเป็นที่รู้จักแพร่หลายทั่วโลก

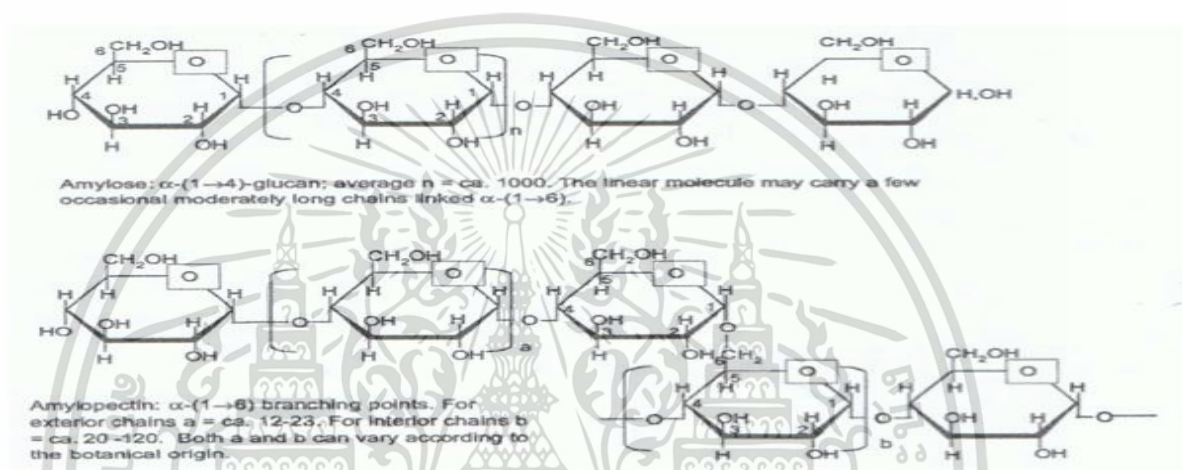
2.1.2.2 ข้าวเสาไห้ หรือ ข้าวพันธุ์เจ๊กเซย เดิมเป็นพันธุ์ข้าวที่พบข้าวพันธุ์นี้ที่อำเภอเสกกระรัง จังหวัดอุทัยธานี เป็นข้าวที่มีลักษณะดี โดยพ่อค้าชาวจีนชื่อเจ๊กเซย ได้นำเมล็ดข้าวพันธุ์นี้มาให้ชาวนาในอำเภอเสาไห้ จังหวัดสระบุรีทดลองปลูก ปรากฏว่าข้าวพันธุ์นี้มีความเหมาะสมสามารถเติบโตได้ดีในเขตอำเภอเสาไห้ ตลอดจนเจ้าของโรงสีต่าง ๆ ชอบและรับซื้อในราคาสูงเป็นข้าวสารที่มีคนนิยมบริโภคกันมาก ตลาดข้าวเสาไห้จึงได้ขยายตัวอย่างกว้างขวาง ลักษณะของข้าวเสาไห้ มีเปลือกบาง จมูกข้าวเล็ก เมล็ดยาว สีเป็นขาวใสน้ำหนักเมล็ดดี เมล็ดมีความเลื่อมมัน และเป็นข้าวที่มีคุณสมบัติที่ดีตรงตามความต้องการของตลาดเพราะหุงขึ้นหม้อ ไม่แฉะ ข้าวสุกร่วนไม่แข็ง และรสชาติดี โดยลักษณะเด่นของข้าวเสาไห้ เป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (ร้อยละ 27-32) เมื่อสุกแล้วค่อนข้างร่วน เป็นข้าวพื้นเมืองที่ปลูกในภาคกลางซึ่งมีอยู่หลายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์เจ๊กเซย ขาวกอเดียว เหลืองทอง เจริญทอง ขาวสมนึก และขาวดาหมี ซึ่งในปัจจุบันชาวนาใน

จังหวัดสระบุรี ยังปลูกข้าวพันธุ์เจ้าเขยที่มีคุณภาพในการหุงที่ดี เป็นข้าวหุงสุกร่วน ขึ้นหม้อ ไม่แฉะ หรือแข็งกระด้าง และเป็นข้าวที่ไม่มียากันสาร ถึงแม้จะเป็นข้าวค้างปี (อรอนงค์, 2556)

2.2 แป้งและคุณสมบัติทั่วไปของแป้ง

2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของแป้ง

โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) โดยส่วนใหญ่สตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพคติน (amylopectin) แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน

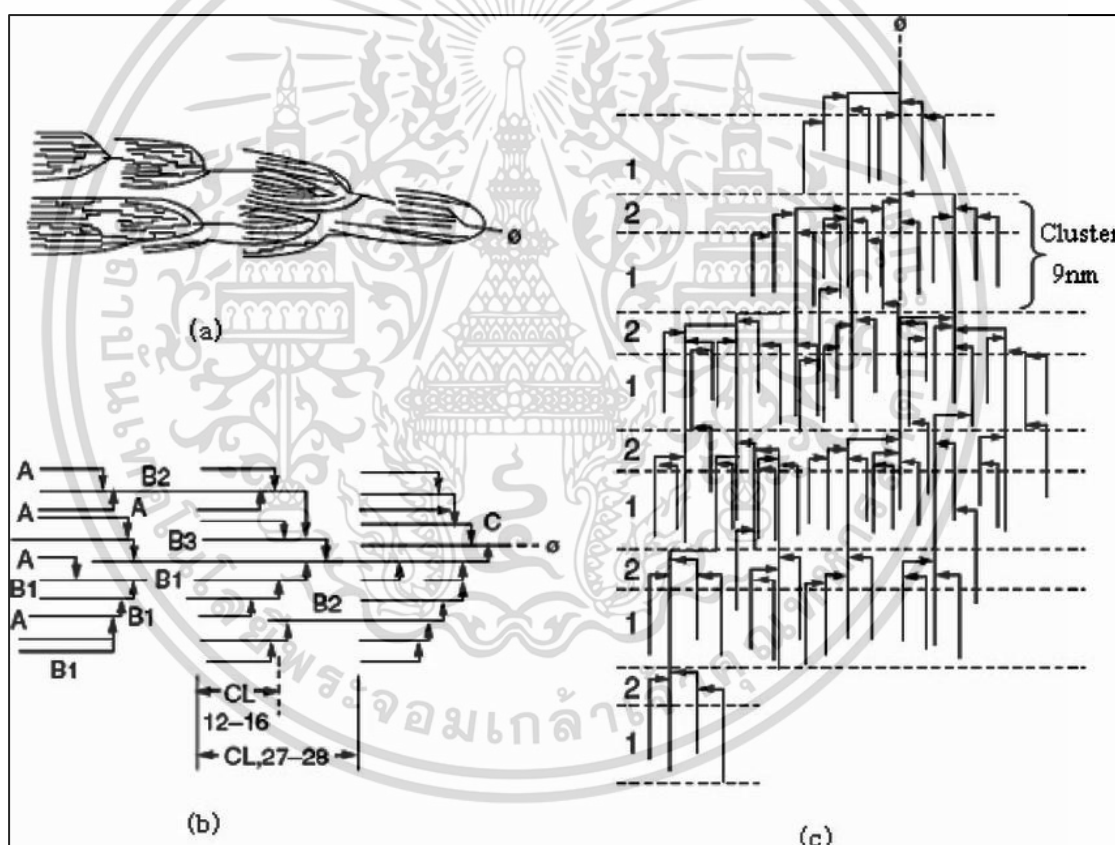
ที่มา: Tester และคณะ (2004)

2.2.1.1 อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000-6,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และอาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะมิโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (Hizukuri, 1985) อะมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน และมีค่าระดับขั้นของพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization, DP) แตกต่างกันด้วยตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสตาร์ช อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โครงสร้างของอะมิโลสมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว หรือม้วนบางช่วง (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย ซึ่งถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500-160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุล เป็นลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจงและอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler และ

Daniel, 1984)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 อะมิโลเพคติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โครงสร้างจะประกอบด้วย ส่วนที่เป็น เส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็น กิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพคตินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า และสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ในอะมิโลเพคตินแต่ละ โมเลกุลจะประกอบด้วย สาย C หนึ่งสายเท่านั้น สำหรับอะมิโลเพคตินของสตาρχ้าว สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80-90 จะประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีกร้อยละ 10-20 จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพคติน

ที่มา: Miao และคณะ (2013)

ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาρχ แป้งสตาρχที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเม็ดสตาρχขนาดเล็กโดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (scanning electron microscope; SEM) พบว่าเม็ดสตาρχจะมีขนาด รูปร่าง และ ลักษณะ

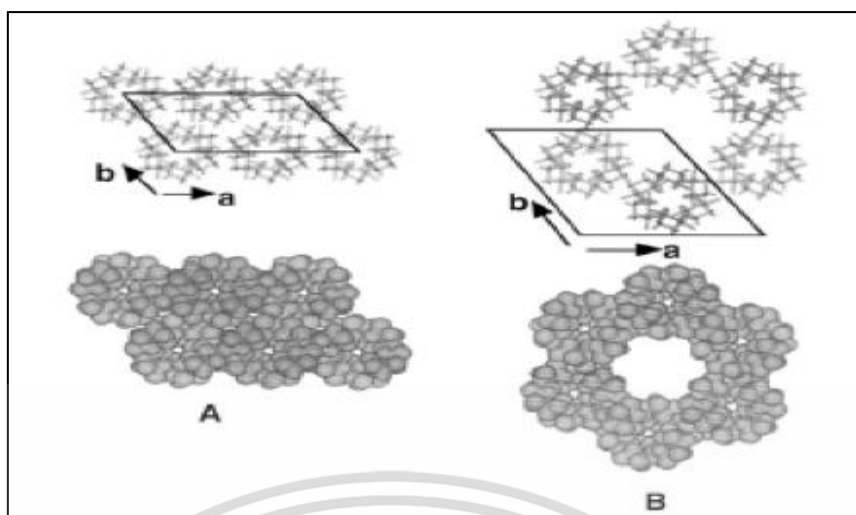
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้งสาลีชนิดนั้น ๆ เม็ดสาลีมีลักษณะโครงสร้างผลึกทั้งหมด 4 แบบ คือ ผลึกแบบ A B C และ V ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และภาพที่ 2.3 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันจะให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดสาลีได้โดยเทคนิครังสีเอ็กซ์เรย์ สตรีที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน จะให้รูปแบบของการหักเหรังสีเอ็กซ์เรย์ (x-ray diffraction) ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ

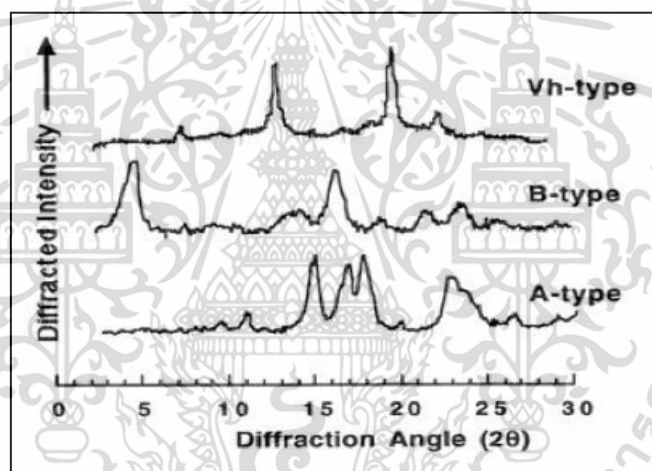
รูปแบบผลึก	การจัดเรียงตัว	ตำแหน่งพีค	แหล่งที่พบ
ผลึกแบบ A	การจัดเรียงตัวหนาแน่นมาก และมีปริมาณน้ำต่ำ	ให้พีคที่ 17 และ $17.9^{\circ}2\theta$ แต่ไม่มีพีคที่ $5.6^{\circ}2\theta$	แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด เป็นต้น
ผลึกแบบ B	การจัดเรียงตัวกันหลวมๆ และมี ปริมาณน้ำสูง	ให้พีคที่ 5.6 และ $17^{\circ}2\theta$ แต่ไม่มีพีคที่ $17.9^{\circ}2\theta$	แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง
ผลึกแบบ C	เกิดการ เรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C	ให้พีคที่ 5.6 และ $17.9^{\circ}2\theta$	แป้งจากพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเขียว ถั่วดำ ถั่วแดง
ผลึกแบบ V	เป็นลักษณะผลึกที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้ว	ให้พีคที่ 13 และ $20^{\circ}2\theta$	โดยทั่วไปเป็นสตรัคที่เกิดเจลาติโนเซชันแล้วจับตัวกับไขมัน

ที่มา: Buléon และคณะ (1998)



ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B

ที่มา: Buléon และคณะ (1998)



ภาพที่ 2.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชที่มีลักษณะ

โครงสร้างผลึกแบบ A, B และ Vh

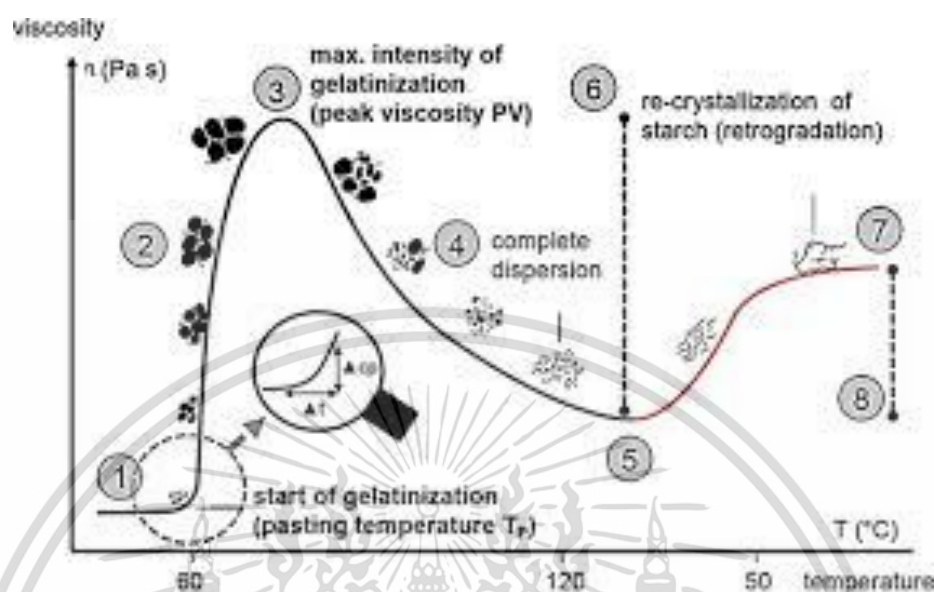
ที่มา: Buléon และคณะ (1998)

2.2.2 การเกิดเจลาตินไนเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxy group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห micelles ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach, 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนเข้าไป พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวของผสมจะมีความหนืดมากขึ้น และใสขึ้น เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเจลาติไนเซชันของแป้ง

ที่มา: Schirmer และคณะ (2015)

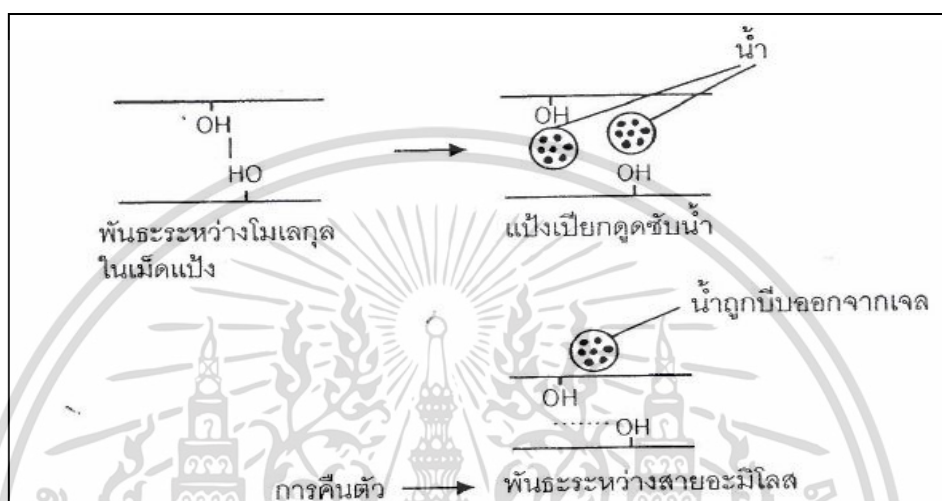
การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้อย่างรวดเร็วโดยจะดูดซึมน้ำเข้ามามากเรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้าง เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอนการละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจลาของแป้งทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ต่าง ๆ ได้ดีกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิด และองค์ประกอบของแป้ง เช่น สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่าง ๆ มีลักษณะการเกิดเจลาที่แตกต่างกันไป (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

2.2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นลงโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถอุ้มน้ำ และ ไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีกมีความหนืดคงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเป็นเจลเรียกปรากฏการณ์ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ setback เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจลซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง

ที่มา: กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล (2546)

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในสตาร์ช ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของสตาร์ชสูง สตาร์ชสามารถคืนตัวได้ดีในช่วงพีเอช 5-7 สตาร์ชที่มีอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มาก และเร็วกว่าสตาร์ชที่มีอะมิโลเพคตินสูง ในการทำให้ อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส อะมิโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

2.2.4 สมบัติทางความร้อนของแป้ง

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimetry (DSC) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) โดยอาศัยหลักการที่ว่า ทั้งตัวอย่าง และสารอ้างอิงจะต้องคงอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันในกระบวนการให้ความร้อน หรือทำให้เย็นลงที่อัตราที่

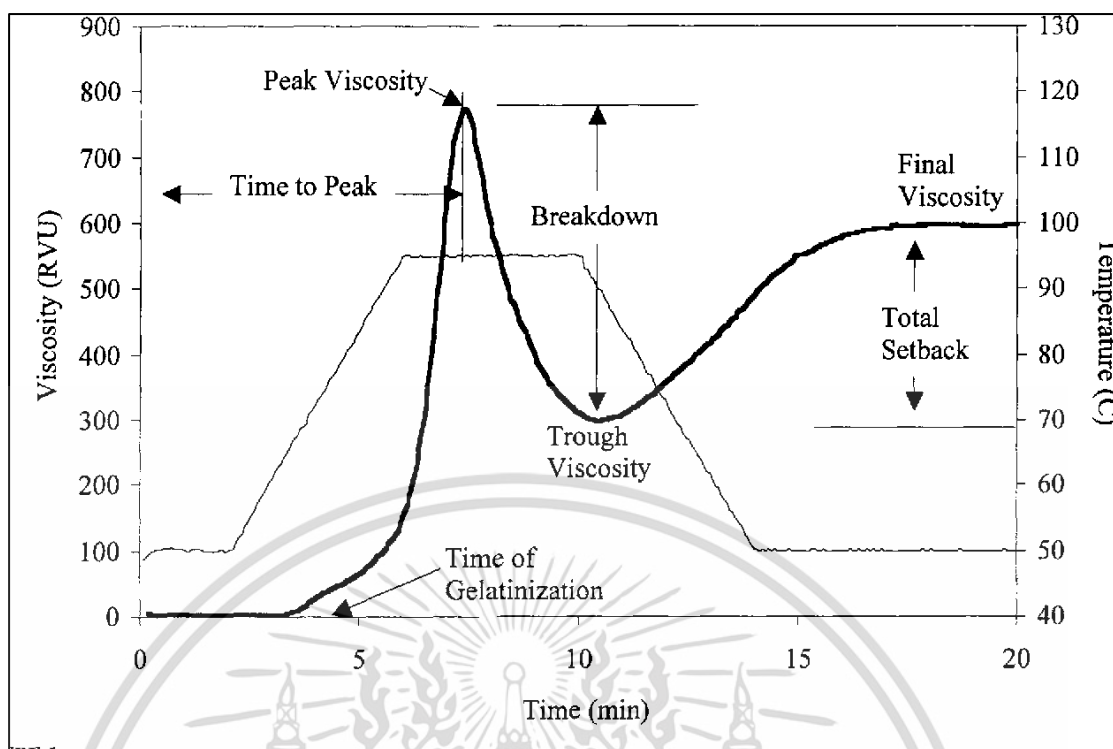
กำหนดไว้ คือ มีการให้ความร้อนเริ่มต้นที่ 20 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลขช่วงในการเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจลาคีโนเซชันคือ 100 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยมีการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งกับน้ำและบ่มสารละลายไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ปริมาณความร้อนจะไหลเข้าสู่ระบบทั้งในส่วนของตัวอย่างและสารอ้างอิง เพื่อที่จะพยายามรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ สัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของกำลัง (power) ซึ่งป้อนให้กับตัวให้ความร้อน (heater) ทั้งสองจะบันทึกเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเพื่อที่อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องสามารถทำการวัดได้ ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิด เจลาติโนเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิด เจลาติโนเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่เกิดเจลาติโนเซชันสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดเจลาติโนเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชัน หรือพลังงานในการสลายโครงร่างผลึก (enthalpy, ΔH) ในการวิเคราะห์หาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจำเป็นต้องหาพื้นที่ใต้กราฟ DSC และการหาเส้น baseline ที่ถูกต้องแม่นยำสำหรับการหาพื้นที่ใต้กราฟมีความสำคัญมาก เนื่องจากเส้น baseline มักมีความแตกต่างกันทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการที่ศึกษา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำไปใช้หาอุณหภูมิและพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนแปลง (enthalpy) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง

2.2.5 พฤติกรรมทางความหนืด

พฤติกรรมทางความหนืดเป็นดัชนีที่มีความไวต่อการจำแนกประเภทของแป้ง การติดตามพฤติกรรมทางความหนืดของแป้งนิยมใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (rapid visco analyser, RVA) และบาร์เบนเดอร์อะมิโลกราฟ (brabender amylograph) เครื่อง rapid visco analyser (RVA) ใช้ปริมาณตัวอย่างและระยะเวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่า แต่ทั้งสองเครื่องมือมีพารามิเตอร์หลักที่ใช้แสดงพฤติกรรมทางความหนืดเหมือนกัน ดังแสดงในตัวอย่างกราฟที่ได้จาก RVA ดังแสดงในภาพที่ 2.7 เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อน และกวนตลอดเวลาจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพราะเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และจะมีเม็ดแป้งบางส่วนที่แตกสลายอยู่เรื่อย ๆ เมื่อใดก็ตามที่ส่วนแตกสลายมีมากกว่าส่วนที่พองตัวเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลง จุดที่น้ำแป้งมีความหนืดสูงสุดเรียกว่า peak viscosity ถ้าเม็ดแป้งไม่คงตัว และแตกมากความหนืดจะลดลงจนถึงระดับความหนืดต่ำสุดเรียกว่า trough viscosity ค่าผลต่างระหว่าง peak viscosity และ trough viscosity เรียกว่า breakdown จากนั้นเมื่อสิ้นสุดการหุงต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จะเข้าสู่ช่วงการทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงไปเป็น 50 องศาเซลเซียส ความหนืดจะสูงขึ้น (final viscosity) เนื่องจากการคืนตัวของโมเลกุลอิสระของอะมิโลส หรืออะมิโลเพคตินที่แตกสลายไปแล้ว จะกลับมาจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนใหม่ ค่าการคืนตัว (setback) จึงเป็นปริมาณความหนืดจากความหนืดต่ำสุดไปถึงความหนืดสูงสุดขณะเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

ที่มา: Higley และคณะ (2003)

2.2.6 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

น้ำที่อยู่ในแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึกน้ำในรูปที่ไม่อิสระ (bound water) และน้ำในรูปอิสระ (free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้นร้อยละ 8 - 10 สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำ กับ หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้งจะได้สูตรโมโนไฮเดรต $[nC_6H_{10}O_5 \cdot H_2O]$

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดสตาร์ชได้อย่างอิสระ เมื่อนำแป้งมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (molecular sieve) ของสารที่จะแพร่เข้าไปในเม็ดสตาร์ช (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในเม็ดสตาร์ชจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของ

แป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช สิ่งเจือปนภายในเม็ดสตาร์ช ที่ไม่ใช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรทางเคมี รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดสตาร์ช แต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลาย น้ำแป้ง เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของ แป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่ อุณหภูมิห้องเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศห้อง จนเกิดสมดุลของความชื้น

2.2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง

1) ชนิดของแป้ง แป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบในการพองตัวและการละลาย แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถแบ่งแป้งออกเป็น 3 ชนิด คือ แป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนราก และแป้งจาก ส่วนหัว แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายใน เม็ดสตาร์ชที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึก และบริเวณ ออสชันฐานของเม็ดสตาร์ช แป้ง จำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุด เนื่องจากมีปริมาณ อะมิโลสสูง ซึ่งอะมิโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชแข็งแรงขึ้น ทำให้พองตัวได้ต่ำ แป้งจากส่วนรากหรือส่วนกลางลำต้น (pith) เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีการพองตัวเพียงชั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า แป้ง จากส่วนรากจะเกิดเจลลาติในเซชันที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมัน ฝรั่ง จะมีการพองตัวสูงเนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในแป้งมัน ฝรั่งยังทำให้เกิดการพองตัวสูงขึ้นเนื่องจากสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าได้ การพองตัว ในแป้งจากส่วนหัวจะเกิดเพียงชั้นเดียว และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ รูปแบบนี้จะเป็นลักษณะของแป้งที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte)

2) ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช หรือจำนวนและ ชนิดของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช ในระดับโมเลกุลมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจำนวนของ พันธะได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบ และการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนของอะมิโลส และ อะมิโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวน กิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัวและความยาวของสาขาในอะมิโลเพคติน

3) สิ่งเจือปนในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น กรดไขมันใน ธรรมชาติของแป้งข้าวโพดปกติจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช โดยเกิดเป็นสารประกอบ เชิงซ้อนกับอะมิโลส (lipid-amylose complex) นอกจากนั้นการใส่สารลดแรงตึงผิวในแป้งจะมีผล ต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ช การใส่โพแทสเซียม ปาล์มมิเตท (potassium palmitate) และสเตียเรท (stearate) จะลดกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่การใส่โซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate) และซีติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyl trimethyl ammonium bromide) จะเพิ่มกำลัง

การพองตัวของเม็ดสตาร์ชคุณสมบัติหลังการตัดแปรทางเคมี คุณสมบัติการพองตัว และการละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแป้งจะเปลี่ยนไป เมื่อมีการตัดแปรทางเคมี เช่น การตัดแปรด้วยกรด หรือ การเกิดออกซิเดชัน ด้วยเกลือไฮโปคลอไรต์ (hypochlorite) จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดสตาร์ชกระจายออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ การละลายและการพองตัวสูงขึ้น

4) ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว สารละลายที่มีปริมาณแป้งต่ำกว่าร้อยละ 20 ค่าการละลายจะสูงกว่าเมื่อมีแป้งสูงกว่าร้อยละ 20 สารประกอบอื่น ๆ เช่น ซูโครส กลูโคส มีผลกระทบต่อการพองตัวของแป้ง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครส และลดปริมาณแป้งลงทำให้แป้งสามารถละลายได้เพิ่มขึ้น

2.3 ประเภทฟลาวัวร์ข้าวที่แบ่งตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย

กระบวนการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ช เริ่มตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก ฟัน จะทำหน้าที่เคี้ยวบดอาหารให้มีขนาดเล็กลง ในน้ำลายมีเอนไซม์ชื่อแอลฟาอะไมเลส (α -amylase) ซึ่งสามารถย่อยสตาร์ชให้มีขนาดเล็กลงเป็นเดกซ์ตริน (dextrin) แต่การย่อยอาหารในปากจะเกิดขึ้น เพียงเล็กน้อย เพราะอาหารอยู่ในปากเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ จากนั้นอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะอาหาร ซึ่งมีเอนไซม์อะไมเลสอยู่แต่ไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากอะไมเลสไม่ทำงานในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง ดังนั้นในกระเพาะอาหารจึงเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส คือ การแตกตัวของคาร์โบไฮเดรต ทำให้แป้งโมเลกุลใหญ่มีขนาดเล็กลง จากนั้นกระบวนการย่อยแป้งที่แท้จริงจะเกิดที่ลำไส้เล็กซึ่งมีสภาพเป็นด่างที่เหมาะสมกับสภาวะการย่อยโดยน้ำดีทำให้ลำไส้เล็ก สามารถย่อยสตาร์ชจนสุดท้ายได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่สามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ ดังนั้นในเชิงโภชนาการสตาร์ช (nutritional starch) อัตราการย่อย และการดูดซึมของแป้งจะเป็นตัวกำหนดการตอบสนองต่อการเผาผลาญอาหาร ซึ่งแสดงจากการตอบสนองต่อระดับน้ำตาลในเลือดของร่างกายหลังการรับประทานอาหาร แต่ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ต้องใช้ระยะเวลายาวนาน และมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาโดยจำลองสภาวะจริงของระบบการย่อยในกระเพาะและลำไส้ของมนุษย์ แล้วทำการวัดปริมาณกลูโคสที่ปล่อยออกมาในแต่ละช่วงเวลา (*in vitro* digestion) (Goñi และคณะ 1997) โดยสามารถแบ่งส่วนต่าง ๆ ของแป้งในเชิงคุณค่าทางอาหารของสตาร์ช (nutritional starch) โดยทั่วไปแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภท ตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย ได้แก่ สตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch; RDS) สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch; SDS) และสตาร์ชทนย่อย (resistant starch; RS) (Englyst และคณะ 1992)

2.3.1 สตาร์ชที่ย่อยเร็ว (rapidly digestible starch; RDS)

โครงสร้างหลักของสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) โดยทั่วไปจะเป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous) และ dispersed starch ซึ่งจะถูกละลายโดยเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็วไป เป็นน้ำตาลกลูโคสภายใน 20 นาที และพบได้ทั่วไปในอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งที่ผ่านการหุงสุกใหม่

2.3.2 สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch; SDS)

สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) จะมีลักษณะคล้ายกับสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) แต่จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ได้ช้ากว่า และคาดว่าจะถูกย่อยสลายได้สมบูรณ์ในลำไส้เล็ก โดยสามารถตรวจวัดปริมาณได้โดยใช้วิธีทางเคมี ซึ่งจะเป็นส่วนที่ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ไปเป็นน้ำตาลกลูโคสหลังจากการย่อย 120 นาที พบได้ในแป้งสตาร์ชธรรมชาติดิบ (raw native starch) ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A และ C เช่น แป้งสตาร์ชจาก พืชธัญชาติ และผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุกแล้ว เป็นต้น และเนื่องจากสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์อย่างช้า ๆ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจะเป็นผลดีสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารที่มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) สูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ปานกลาง ซึ่งมีข้อมูลทางการแพทย์ที่แสดงว่าอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ต่ำ สามารถลดโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหลอดเลือดหัวใจตีบ

2.3.3 สตาร์ชทนย่อย (resistant starch; RS)

สตาร์ชทนย่อย (RS) หมายถึง สตาร์ชและผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ และ ดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ แต่เป็นส่วนน้อย โดยเมล็ดสตาร์ชจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายในร่างแหของโปรตีน หรือถูกตรึงอยู่ภายในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในเมล็ดสตาร์ชได้ (เกื้อกูล และ กล้าณรงค์, 2546) โดยสตาร์ชทนย่อยสามารถแบ่งได้เป็น 5 ชนิด ได้แก่ (Englyst และคณะ 2007)

1) สตาร์ชที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ (physically inaccessible starch หรือ RS1) พบในเมล็ดพืชที่ถูกทำลายไปบางส่วนจากการบด ในพืชตระกูลถั่ว (legumes) จะพบมากเนื่องจากมีผนังเซลล์หนา กระบวนการเตรียมและการกระบวนการหุงต้มมีอิทธิพลมากต่อปริมาณ RS ในอาหาร เพราะจะทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย (Champ และคณะ 2003)

2) เม็ดสตาร์ชดิบที่ทนต่อการทำงานของเอนไซม์ (ungelatinized starch หรือ RS2) เช่น เม็ดสตาร์ช มันฝรั่งดิบ เม็ดสตาร์ชกล้วยดิบ เม็ดสตาร์ชถั่วดิบ และในสตาร์ชข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง (Nugent, 2005) โดยคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ การเกิดเจลลาคติในเซชันของสตาร์ชจะช่วยให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น (Champ และคณะ 2003)

3) สตาร์ชที่ผ่านการรีโทรเกรเดชัน (retrograded starch หรือ RS3) อาหารที่ผ่านการให้ความร้อนจนสตาร์ชเกิดการเจลลาคติในเซชัน แล้วถูกทำให้เย็นตัวลง ทำให้ส่วนของอะมิโลสที่กระจาย ออกมาจากเม็ดสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้เป็นผลึกที่แข็งแรง และทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Lunn และ Buttriss, 2007)

4) สตาร์ชที่ดัดแปรทางเคมี (chemically modified starch หรือ RS4) เป็นการดัดแปรโครงสร้างด้วยสารเคมีหรืออุณหภูมิ เพื่อให้สตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสตาร์ชโดยมีพันธะชนิดอื่นนอกเหนือไปจากพันธะ α -(1-4) และ α -(1-6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีความแข็งแรงของพันธะมากขึ้น เช่น สตาร์ชอีเทอร์ (starch ethers) และ สตาร์ชเอสเทอร์ (starch esters) รวมถึงสตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้าม (cross-bonded starch) (Baghurst และคณะ 1996)

5) Amylose-lipid complexed starch (RS5) เป็นสตาร์ชทนต่อการย่อยของเอนไซม์ที่เกิดจาก การทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลอะมิโลสกับไขมัน เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง มีความเสถียรต่อ ความร้อนสูงและสามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้

2.3.3.1 ประโยชน์ทางสรีระวิทยาของสตาร์ชทนย่อย

1) สตาร์ชทนย่อยเป็นใยอาหาร (dietary fiber) สตาร์ชทนย่อยเป็นสตาร์ชที่ทนทานต่อการย่อยจากเอนไซม์ของมนุษย์ จึงจัดเป็นองค์ประกอบของใยอาหารชนิดหนึ่ง สามารถใช้วิธีการวิเคราะห์แบบใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) ได้ และมีประโยชน์ทางสรีระวิทยาเหมือนใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) คือ ทำให้ระบบการย่อย และการเผาผลาญกลูโคสได้ช้าลง จึงส่งผลดีต่อลำไส้ใหญ่ ช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด (Sajilata และคณะ 2006)

2) อัตราการย่อยอาหารต่ำ (hypoglycemic effects) อาหารที่มีสตาร์ชทนย่อย ทำให้อัตราการย่อยต่ำ โดยทั่วไปอาหารประเภทแป้งจะเกิดการย่อยเกือบจะทันทีหลังการบริโภคอาหาร แต่อาหารที่มีสตาร์ชทนย่อยจะเกิดการย่อยได้ช้า ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากรับประทานอาหารแล้ว 5-7 ชั่วโมง ดังนั้น สตาร์ชทนย่อยจึงลดค่าดัชนีน้ำตาลได้

3) 프리ไบโอติก (prebiotic) เนื่องจากสตาร์ชทนย่อยไม่ถูกย่อยและดูดซึมในลำไส้เล็ก จึงผ่านมายังลำไส้ใหญ่และถูกหมักด้วยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ ทำให้เกิดกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) ได้แก่ อะซิเตท บิวทีเรท และโพรปิโอเนต สารเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นที่ช่วยให้พลังงานแก่แบคทีเรียโพรไบโอติก (probiotic) เช่น *Bifidobacterium* ทำให้เจริญเติบโตได้ดี

4) ยับยั้งการสะสมไขมัน และลดการสะสมคอเลสเตอรอล โดยหลังจากรับประทานอาหารที่มีสตาร์ชทนย่อย พบว่ามีการเกิดออกซิเดชันของไขมันเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าสตาร์ชทนย่อยช่วยลดการสะสมของไขมันในระยะยาวได้ และเมื่อศึกษาในหนูทดลองที่ให้อาหารที่มีสตาร์ชทนย่อย (มันฝรั่งดิบร้อยละ 25) พบว่าระดับคอเลสเตอรอล และไตรกลีเซอไรด์ในเลือดลดลง

2.3.4 ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

ค่าดัชนีน้ำตาลเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตโดยวิเคราะห์ว่าคาร์โบไฮเดรตที่บริโภคจะย่อยยากง่าย และเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดในเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากรับประทาน และเข้าสู่ระบบการย่อยและดูดซึมของร่างกายสามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้มากหรือน้อยโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน คือ น้ำตาลกลูโคส หรือขนมปังขาวซึ่งมีค่าดัชนีน้ำตาล

เท่ากับ 100 ในการรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงในปริมาณมาก คาร์โบไฮเดรตในอาหารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกย่อยเป็นกลูโคส และถูกดูดซึมอย่างรวดเร็ว มีผลไปกระตุ้นให้มีการหลั่งฮอร์โมนอินซูลิน ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ทำให้กลูโคสถูกนำเข้าสู่เซลล์ต่าง ๆ ในร่างกายเพื่อเผาผลาญให้เป็นพลังงาน แต่หลังจากการรับประทานอาหารไปแล้ว 2 - 4 ชั่วโมง ปริมาณอาหารที่ถูกดูดซึมในทางเดินอาหารจะลดลง แต่ฤทธิ์ของอินซูลินยังคงอยู่ ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดลดลงมากจนเกินไป จนอาจทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดต่ำ และทำให้รู้สึกอยากอาหาร ส่วนคนที่รับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ระดับน้ำตาลในเลือดยังคงอยู่ในระดับปกติ หลังจากการรับประทานอาหาร 4 - 6 ชั่วโมง (Frost และคณะ 1999) กล่าวได้ว่าการรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำจะช่วยให้เซลล์ร่างกายของใช้อินซูลินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด ซึ่งเป็นการช่วยควบคุมสถานการณ์เบาหวานให้ดีขึ้นได้ ดังนั้น ผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวานควรคำนึงถึงค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารที่บริโภค และควรบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำเพราะนอกจากประโยชน์อื่น ๆ ที่เกิดจากการย่อย และดูดซึมช้าแล้วยังเป็นอาหารที่ช่วยให้รู้สึกอิ่มง่ายและอิ่มนาน ทำให้เกิดผลดีต่อสุขภาพในระยะยาว และได้มีการแบ่งอาหารตามค่าดัชนีน้ำตาลได้เป็น 3 ชนิดคือ ค่าดัชนีน้ำตาลสูง (GI มากกว่าหรือเท่ากับ 70) ค่าดัชนีน้ำตาลปานกลาง (GI เท่ากับ 56-69) และค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (GI น้อยกว่าหรือเท่ากับ 55) ซึ่งการบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำอย่างสม่ำเสมอ สามารถลดความเสี่ยงของโรคอ้วน มะเร็งลำไส้ และมะเร็งบริเวณทรวงอกได้

2.3.4.1 อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 55 หรือ น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ เช่น ถั่วชนิดต่าง ๆ ผักและอาหารที่มีเส้นใยสูง ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ โยเกิร์ตไขมันต่ำและไม่หวาน เกรฟฟรุต แอปเปิ้ล และมะเขือเทศ หรือแป้งดัชนีน้ำตาลต่ำ เป็นต้น แป้งดัชนีน้ำตาลต่ำเป็นแป้งธรรมชาติที่นำมาผ่านกระบวนการต่างจนมี คุณสมบัติเทียบเท่าเส้นใยอาหาร จะไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์จึงสามารถจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณแป้งทนย่อยสูงหรือแป้งลดค่าดัชนีน้ำตาล

2.3.4.2 อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลปานกลาง จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 56-69 เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล ปานกลางจะเป็นอาหารประเภทเส้น ถั่วคั่ว ถั่วฝักยาว มันเทศ น้ำส้มคั้น บลูเบอร์รี่ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว ชุปถั่ว และข้าวกล้อง เป็นต้น

2.3.4.3 อาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูง จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 70 หรือ มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ประเภทของอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงได้แก่ ขนมปังขาว corn-flake ข้าวเม็ล็ดสั้น มันฝรั่งอบ มันฝรั่งทอด (french fries) ไอศกรีม ลูกเกด ผลไม้อบแห้งกล้วย แครอท ผลไม้ที่มีรสหวาน เช่น แดงโม เป็นต้น

2.4 การดัดแปรแป้ง

แป้งดัดแปร (modified starch) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้งธรรมชาติ มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน หรือเอนไซม์ หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรมได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการการผลิต หรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้น จึงมีการดัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน การดัดแปรแป้งแบ่งกลุ่มตาม Bemiller (1997) มีดังนี้

2.4.1 การดัดแปรทางเคมี (chemical modification)

เป็นการเปลี่ยนสมบัติของแป้ง โดยให้แป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมี ได้แก่

2.4.1.1 การเกิดอนุพันธ์ (derivatization) โดยการแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง หรือการแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่

2.4.1.2 การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (acid thinning)

2.4.1.3 การเกิดเดกซ์ทรินในเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดโมเลกุล หรือการเปลี่ยนการจับเกาะโดยใช้ความร้อนกับกรด

2.4.1.4 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสี และลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.4.2 การดัดแปรทางเอนไซม์ (enzymatic modification)

เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง เพื่อลดขนาดโมเลกุลของสตาร์ช เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสตาร์ช สามารถทำให้เม็ดสตาร์ชมีผลึกที่แข็งแรง

2.4.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnology modification)

เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

2.4.4 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

การดัดแปรทางกายภาพเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้โครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ใช้พลังงานความร้อน หรือพลังงานจลน์ หรือทั้งสองอย่างประกอบกัน เมื่อโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชได้ถูกเปลี่ยนแปลงไป สมบัติของสตาร์ชก็เปลี่ยนไปเช่นกัน แบ่งออกได้เป็น

2.4.4.1 การทำให้เกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนจนผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาตินในเซชันแล้วทำให้แห้งทันที ทำให้แป้งชนิดนี้สามารถละลายในน้ำเย็นได้

2.4.4.2 การทำแป้งละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble-starch; GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่ละลายในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลลิตในเซชัน

2.4.4.3 การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล (ball milling treatment)

2.5 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวเพื่อให้มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูงหรือมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ

2.5.1 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น (heat-moisture treatment; HMT)

การดัดแปรโดยวิธีทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น เป็นการดัดแปรทางกายภาพวิธีหนึ่งที่มีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ใช้สารเคมี และปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม มีผลทำให้สมบัติของสตาร์ชเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการจัดเรียงตัวภายในโมเลกุลของสตาร์ชแกรนูล โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูล การใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น มีความเกี่ยวข้องกับสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำและความชื้นต่ำกว่าปริมาณน้ำและความชื้นที่ทำให้เกิดเจลลิตในเซชันแต่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันจะเรียกว่าการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Lim และคณะ 2001) การใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น มีความเกี่ยวข้องกับสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำและความชื้นต่ำกว่าปริมาณน้ำและความชื้นที่ทำให้เกิดเจลลิตในเซชันแต่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน จะเรียกว่าการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น ด้วยเหตุนี้ จึงมีการใช้อุณหภูมิกับความชื้น และน้ำกับความชื้น ในการดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพ โดย Collado และ Corke (1999) ได้อธิบายความหมายของวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น โดยการทำให้สตาร์ชแกรนูลที่ถูกจำกัดปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 18-27 ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น หรือการให้ความร้อนมากกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลานาน ซึ่งส่วนมากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชัน โดยอุณหภูมิที่ใช้จะแตกต่างกันตามชนิดของสตาร์ช ซึ่งเวลาที่ใช้นั้นจะแปรผันกับอุณหภูมิ และปริมาณน้ำที่ใช้ และ Jacobs และ Delcour (1998) ได้ให้นิยามในการดัดแปรด้วยวิธีนี้เพิ่มเติมว่าเป็นการดัดแปรสตาร์ชทางกายภาพโดยบ่มสตาร์ชที่ความชื้นต่ำ ซึ่งควรต่ำกว่าร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาหนึ่ง พร้อมกับให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ (glass transition temperature) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตในเซชัน (gelatinization temperature) ของสตาร์ชที่สภาวะนั้น ๆ ปกติแล้วเป็นการให้ความร้อนสตาร์ชมากกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยที่สตาร์ชมีความชื้นมากกว่าปกติเล็กน้อย คือประมาณร้อยละ 18-27 เป็นเวลานาน ซึ่งเวลาจะแปรผันกับอุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และสภาวะที่ใช้ในการดัดแปร

2.5.2 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิ่ง (annealing; ANN)

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีแอนนิลลิ่ง โดยมีการควบคุม อุณหภูมิ และเวลาในการดัดแปร มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเมล็ดสตาร์ช และสตาร์ชที่มีปริมาณน้ำ หรือ

ความชื้นสูงกว่าการตัดแปรร สดาร์ชด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น และมีปริมาณความชื้นที่จะทำให้เกิดเจลลาตินในเซชัน แต่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลาตินในเซชัน

การวิธีแอนนิลลิงเป็นการแช่แข็งสตาร์ชในน้ำปริมาณมาก คือมากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก หรือปานกลางร้อยละ 40-50 โดยน้ำหนัก เป็นเวลาหนึ่งภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า glass transition temperature (Tg) แต่ต่ำกว่า onset gelatinization temperature (To) (Jacobs และ Delcour, 1998) หลังจากผ่านการวิธีแอนนิลลิงแล้วโครงสร้างสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยธรรมชาติแล้วแป้งสตาร์ชมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบกิ่งผลึก โดยโมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวกันเป็นเม็ดแป้ง เป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วน ออสถฐาน ส่วนสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวววนคู่ ทำให้บางส่วนเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนออสถฐานของเม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลส และสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) นอกจากนี้การวิธีแอนนิลลิง ยังทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.6 ขนมห่อม่วง

ขนมไทยโบราณ มีมาตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 2 พระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย ดังปรากฏในกาพย์เห่ชมเครื่องหวาน “ห่อม่วงเหมาะมีรส หอมปรากฏกลโกสุ่ม คัดลิสไบปกคลุม หุ้มห่อม่วงดวงพุดตาน” (ชลดา, 2552) เป็นขนมที่ต้องใช้ความประณีต ในการจับจีบตัวแป้งหลังการห่อหุ้มไส้แล้วให้มีลักษณะเป็นรูปดอกไม้ทำให้มีลักษณะขนมที่ดูนุ่มนวล อ่อนหวานแฝงความมีศิลปะของขนมไทยชาวยุค ขนมห่อม่วงสูตรดั้งเดิมนั้นตัวไส้จะเป็นฟักเชื่อมแห้ง ถั่วลิสงคั่ว งาขาว คั่ว น้ำตาลทราย เกลือป่น หมูสามชั้นคั่วสุก เมื่อนึ่งสุกแล้วจะไม่พรมด้วยกระเทียมเจียวเพราะไม่ใช่ของคาวจัดเป็นของหวานจะต้องพรมด้วยหัวกะทิสดแล้วกลทันทันที จัดใส่จานเสิร์ฟขณะขนมยังอุ่น



ภาพที่ 2.8 ขนมห่อม่วง

ที่มา: sites.google.com/site/kanomchomoung/

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการตัดแปรงทางกายภาพ

สุภาวดี (2556) ได้ศึกษาการตัดแปรงโดยวิธี การให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat moisture treatment; HMT) เป็นการตัดแปรงโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการตัดแปรงข้าวอะมิโลสสูง (พันธุ์ชัยนาท 1) และปริมาณอะมิโลสปานกลาง (พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105) ด้วยวิธี HMT โดยสภาวะในการตัดแปรงข้าว คือ ปริมาณความชื้นร้อยละ 18, 22.5 และ 27 อุณหภูมิ 90, 105 และ 120 องศาเซลเซียส และเวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ต่อคุณสมบัติด้านความหนืด และลักษณะเนื้อสัมผัส การตัดแปรงด้วยวิธี HMT ที่ความชื้นร้อยละ 22.5 อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง มีความเหมาะสมสำหรับการทำเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบแห้ง และแบบ HMT ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ความชื้น 27 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เหมาะสมสำหรับทำก๋วยเตี๋ยวเส้นสด การใช้ข้าวตัดแปรงทางกายภาพสามารถพัฒนาคุณภาพ ของแป้งให้ใกล้เคียงกับแป้งการค้า อย่างไรก็ตามสภาวะในการตัดแปรงขึ้นกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แป้งตัดแปรงแบบความร้อนร่วมกับความชื้น มีความปลอดภัยและถูกกว่าแป้งตัดแปรงทางเคมี

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง

Frei และคณะ (2003) ได้ศึกษาผลของการย่อยของสตาร์ในหลอดทดลองในข้าว 6 สายพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกันที่เพาะปลูกในฟิลิปปินส์ โดยผู้วิจัยได้ศึกษา 2 วิธีการ วิธีการแรก ตัวอย่างข้าวถูกทำให้สุก และนำมาวิเคราะห์ในทันที วิธีการที่ 2 ตัวอย่างข้าวถูกทำให้สุก และบ่มไว้ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชัน จากผลการทดลองพบว่า ค่าดัชนีน้ำตาลระหว่างพันธุ์ข้าวมีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยค่าดัชนีน้ำตาลของตัวอย่างข้าวที่ถูกปรุงสุกจะอยู่ระหว่าง 68 ถึง 109 ส่วนตัวอย่างข้าวที่ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะอยู่ที่ 64 ถึง 87 การบ่มข้าวหุงสุกแล้วในตู้เย็นจะทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลของข้าว 6 สายพันธุ์ลดลง และค่าดัชนีน้ำตาลของพันธุ์ข้าวเหนียวลดลงมากที่สุด

Li และคณะ (2011) ศึกษาการตัดแปรงสตาร์ชถั่วเขียวด้วยกระบวนการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat-moisture treatment) โดยให้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในสตาร์ชจากถั่วเขียวเป็นร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 ที่ความร้อน 120 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า สตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นจะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนขึ้น).สตาร์ชจากถั่วเขียวที่มีความชื้นร้อยละ 20 มีปริมาณสตาร์ช ทนย่อยมากที่สุด

Van Hung และคณะ (2016) ได้ศึกษาผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาวร์ข้าวที่ต่างกันต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility) และในสัตว์ทดลอง (*in vivo* method) และศึกษาการตัดแปรงฟลาวร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat-moisture treatment; HMT) และวิธีแอนนิลลิง (annealing; ANN) ในการศึกษาใช้ฟลาวร์ข้าว 5 ชนิด ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบเซอร์ยืนยันตนในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณอะมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 4.7-30.6 และมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยร้อยละ 6.3-11.8 หลังจากตัดแปรฟลาวร์ข้าวทั้ง 5 ชนิด ด้วย HMT และ ANN พบว่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 18.5-23.9 และร้อยละ 19.5-26.9 ตามลำดับ ส่วนค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ของฟลาวร์ข้าวตัดแปรทั้งจากวิธี HMT และ ANN มีค่าลดลงจากค่า GI ของฟลาวร์ข้าวดั้งเดิมในช่วงร้อยละ 68.9-100 เหลือร้อยละ 61.2-88.9 และร้อยละ 21.2-43.9 ตามลำดับ ในงานวิจัยพบว่า ปริมาณอะมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณสตาร์ชทนย่อยและค่า GI แต่ปริมาณสตาร์ชทนย่อยสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่า GI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

- 3.1.1 ข้าวเหนียว ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.2 ข้าวหอมมะลิโสธร ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.3 ข้าวหอมมะลิสุนทร ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.4 ข้าวหอมมะลิเชียงราย ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.5 ข้าวเสาไห้ชยันนาท ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย
- 3.1.6 และข้าวเสาไห้สระบุรี ซื้อมาจากตลาดไท ประเทศไทย

3.2 เครื่องมือ

- 3.2.1 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) รุ่น WNB14 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 3.2.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaker water bath) รุ่น SV1422 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 3.2.3 ตู้อบแบบถาด (tray dryer) ผลิตโดยบริษัท Progress ประเทศไทย
- 3.2.4 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) รุ่น UNB 400 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 3.2.5 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น PA4102 ผลิตโดยบริษัท Ohaus ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.6 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น MS204S ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.7 เครื่องบดแห้ง รุ่น SG-10HK ผลิตโดยบริษัท Cuisinart ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.8 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) รุ่น Z 206A ผลิตโดยบริษัท Hermle ประเทศเยอรมนี
- 3.2.9 UV-VIS Spectrophotometer รุ่น UV-1800 ผลิตโดยบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.10 Micro-pipettors และ Tips ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.11 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น SP-2100 ผลิตโดยบริษัท Suntex ประเทศไทย
- 3.2.12 เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) รุ่น MS7-H550-Pro ผลิตโดยบริษัท Scilogex ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.13 เครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) รุ่น G560E ผลิตโดยบริษัท Scientific industries ประเทศสหรัฐอเมริกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.14 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดของแป้ง (rapid visco analyser, RVA) รุ่น RVA-4 ผลิตโดยบริษัท Newport scientific ประเทศออสเตรเลีย

3.2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6610LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

3.2.16 โถดูดความชื้น (desiccator)

3.2.17 เครื่องเคลือบทอง รุ่น SCD 040 ผลิตโดยบริษัท Balzers ประเทศเยอรมนี

3.2.18 เครื่อง Differential Scanning Colorimeter รุ่น DSC 1 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.19 เครื่องวัดสี รุ่น CR-410 ผลิตโดยบริษัท Minolta ประเทศญี่ปุ่น

3.2.20 เครื่องบด (pin mill) รุ่น ZM200 ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมนี

3.2.21 เครื่องแยกขนาด รุ่น AS200 ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมนี

3.2.22 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) รุ่น TA-XT Plus ผลิตโดยบริษัท Stable micro systems ประเทศอังกฤษ

3.2.23 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.2.24 อุปกรณ์ครัว

3.3 สารเคมี

3.3.1 ชุดทดสอบปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch K-RSTAR 10.15) บริษัท Megazyme ประเทศไอร์แลนด์

3.3.2 maleic acid บริษัท Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

3.3.3 sodium hydroxide (NaOH) บริษัท Carlo Erba Reagents ประเทศอิตาลี

3.3.4 calcium chloride dihydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.3.5 sodium azide บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.3.6 potassium hydroxide (KOH) บริษัท Ajax Finechem ประเทศนิวซีแลนด์

3.3.7 absolute ethanol บริษัท RCI Labscan ประเทศไทย

3.3.8 amylose จากมันฝรั่ง บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.3.9 glacial acetic acid บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

3.4 การเตรียมฟลาวัวร์ข้าว

ข้าว 6 ชนิดประกอบด้วย ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิไฮสตร ข้าวหอมมะลิสุรินทร์ ข้าวหอมมะลิเชียงราย ข้าวเสาไห้ชัยนาท และข้าวเสาไห้สระบุรี ถูกลำบากให้เป็นฟลาวัวร์ข้าว โดยนำข้าวมาบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบก่อน จากนั้นนำมาบดละเอียดโดยใช้เครื่องบดแบบละเอียด (pin mill) จากนั้นนำผงข้าวที่ผ่านการบดละเอียดไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอนเพื่อให้ได้เป็นฟลาวัวร์ข้าวที่มีความละเอียด

3.5 การศึกษาผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการย่อยใน

หลอดทดลอง (*in vitro* digestibility)

ฟลาวัวร์ข้าวทั้ง 6 ชนิดที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิไฮสตร ข้าวหอมมะลิสุรินทร์ ข้าวหอมมะลิเชียงราย ข้าวเสาไห้ชัยนาท และข้าวเสาไห้สระบุรี ซึ่งฟลาวัวร์ข้าวทุกชนิดเป็นฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม และยังไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ โดยจะนำฟลาวัวร์ข้าวไปวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.5.1 การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส

การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ทำได้โดยใช้วิธีการของ Juliano (1971) ดังภาคผนวก ก

3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility)

การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ใช้วิธีการ AACC method 32-40.01 (AACC, 2000) โดยชั่งตัวอย่างฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม 0.1 กรัมใส่ลงในหลอดหมุนเหวี่ยง จากนั้นใส่สารละลายผสมของเอนไซม์ pancreatic α -amylase (10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และ amyloglucosidase (3.3 ยูนิตต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และทำการบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 37°C โดยมีการเขย่าอยู่ตลอดเวลา โดยในการหาปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) ใช้เวลาในการบ่ม 20 นาที ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch, SDS) ใช้เวลาในการบ่ม 20-120 นาที (Englyst และคณะ 1992) ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) ใช้เวลาในการบ่ม 16 ชั่วโมง

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) หลังจากครบเวลาในการบ่มตัวอย่างแล้วจะเติมเอทานอล (ร้อยละ 99) ปริมาตร 4 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็วรอบ 1,500 กรัม เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเทส่วนใสใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และเติมเอทานอล (ร้อยละ 50) ปริมาตร 8 มิลลิลิตรลงในหลอดหมุนเหวี่ยงอีกครั้งเพื่อทำการล้างตะกอน นำหลอดหมุนเหวี่ยงไปหมุนเหวี่ยงอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสรวมเข้ากับส่วนใสในครั้งแรก และปรับปริมาตรด้วยสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 ให้ได้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารละลายของตัวอย่างมา ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง และเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (300 ยูนิตต่อ มิลลิลิตร) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร บ่มตัวอย่างในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น เติมสารละลาย glucose oxidase-peroxidase (GOPOD reagent) ปริมาตร 3 มิลลิลิตรและบ่มตัวอย่างใน อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตรและคำนวณหาปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) และปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) ได้ ตามสมการที่ 3.1

$$\text{ปริมาณการย่อยของสตาร์ช (ร้อยละ)} = \Delta E \times (F/W) \times 90 \quad (3.1)$$

เมื่อ ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F = ค่า factor ของการเปลี่ยนแปลงหน่วยเป็น ไมโครกรัมของกลูโคสในสารละลาย
GOPOD Reagent

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม)} = \text{น้ำหนักตัวอย่าง} \times \frac{(100 - \text{ปริมาณความชื้น})}{100} \quad (3.2)$$

ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) คือปริมาณการย่อยของสตาร์ชที่เวลา 20 นาที และ ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) คือปริมาณการย่อยของสตาร์ชที่เวลา 20-120 นาที

การวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ตัวอย่างจะถูกบ่มเอาไว้ในอ่างควบคุม อุณหภูมิที่ 37°C และมีการเขย่าตลอดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำหลอดทดลองมาเติมด้วย เอทานอล (ร้อยละ 99) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,500 กรัม เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง จากนั้นล้างตะกอนอีกรอบโดยการเติมเอทานอล (ร้อยละ 50) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และนำไปหมุนเหวี่ยงอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสทิ้งให้ คงเหลือแต่ตะกอน จากนั้นคว่ำหลอดลงบนกระดาษที่สามารถดูดซับความชื้นเพื่อซับส่วนใสออก ให้หมด และเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ลงในส่วนที่เป็น ตะกอน นำหลอดตัวอย่างไปแช่ในอ่างที่มีน้ำเย็นและทำการกวนตัวอย่างเป็นเวลา 20 นาทีเพื่อสกัด สตาร์ชทนย่อย จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์พีเอช 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตรลงใน หลอดทดลองและคนตัวอย่างให้เข้ากัน เติมเอนไซม์ amyloglucosidase (3300 ยูนิตต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงไปทันที ผสมให้เข้ากันและนำไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 30 นาที จากนั้นนำหลอดทดลองไปหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 10 นาที ดูตัวอย่างขึ้นมาปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง และเติมสารละลาย GOPOD reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร บ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และคำนวณหาปริมาณสารซัลฟอนิเออร์ (RS) ได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ปริมาณสารซัลฟอนิเออร์ (ร้อยละ)} = \Delta E \times (F/W) \times 9.27 \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F = ค่า factor ของการเปลี่ยนแปลงหน่วยเป็น ไมโครกรัมของกลูโคสใน
สารละลาย GOPOD Reagent

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

3.5.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (GI) จะมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนการวิเคราะห์ปริมาณสารซัลฟอนิเออร์เร็ว (RDS) อย่างไรก็ตามเวลาบ่มตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้เวลาในการบ่ม 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที (Goñi และคณะ 1997) ในส่วนของการคำนวณค่าดัชนีน้ำตาล (GI) สามารถคำนวณได้โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการย่อยของสารซัลฟอนิเออร์ (GI) สามารถคำนวณได้โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการย่อยของสารซัลฟอนิเออร์กับเวลา (30-180 นาที) ซึ่งแสดงผลออกมาเป็นกราฟ และจะได้ค่า C_{∞} , C และ t นำมาแทนในสมการที่ 3.4 เพื่อหาค่า k

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \quad (3.4)$$

เมื่อ C = ปริมาณการย่อยของสารซัลฟอนิเออร์ที่เวลา t

C_{∞} = ค่าสมมูลของปริมาณการย่อยของสารซัลฟอนิเออร์

k = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์

t = เวลา (นาที)

จากนั้นนำค่า k มาแทนในสมการที่ 3.5 เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของการย่อย (AUC)

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty} / k) [1 - \exp [-k (t_f - t_0)]] \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C_{∞} = ค่าสมมูลของปริมาณการย่อยของสตาร์ช

t_r = เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 = เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์ (ได้จากสมการที่ 3.4)

ในการหาค่าดัชนีการย่อย (hydrolysis index, HI) สามารถหาได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟการย่อยของตัวอย่างหารด้วยพื้นที่ใต้กราฟการย่อยของตัวอย่างอ้างอิง (ขนมปังขาว) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.6

$$HI = (AUC \text{ ของตัวอย่าง} / AUC \text{ ของตัวอย่างอ้างอิง}) \times 100 \quad (3.6)$$

จากนั้นสามารถหาค่าดัชนีน้ำตาลโดยประมาณ (eGI) ของตัวอย่างได้โดยใช้สมการของ Goñi และคณะ (1997) ดังสมการที่ 3.7

$$GI = 39.71 + (0.549 \times HI) \quad (3.7)$$

เมื่อ HI = ค่าดัชนีการย่อยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

3.5.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

3.6 การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวโดยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้นเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล

การดัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้น (heat-moisture treatment, HMT) ทำได้โดยใช้วิธีการของ Gunaratne และ Hoover (2002) โดยการนำฟลาวัวร์ข้าวทั้ง 6 ชนิดมาแปรปริมาณความชื้นเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 20, 25 และ 30 จากนั้นนำไปต้มโดยการใส่ในภาชนะปิดสนิทเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำฟลาวัวร์ข้าวไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

24 ชั่วโมง และนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นที่สภาวะต่าง ๆ มาวิเคราะห์ดังนี้

3.6.1 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility)

การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในข้อที่ 3.5.2

3.6.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ของฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในข้อที่ 3.5.3

3.6.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

3.7 การคัดแปรฟลาวัวร์ข้าวโดยวิธีการแอนนิลลิงเพื่อเพิ่มปริมาณสารขมขื่น และลดค่าดัชนีน้ำตาล

การคัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิง (annealing, ANN) ทำได้โดยใช้วิธีการของ Jacobs และคณะ (1995) โดยการนำฟลาวัวร์ข้าวทั้ง 6 ชนิดมาเติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนแบ่งต่อน้ำเท่ากับ 1:2 จากนั้นบรรจุลงในภาชนะปิดสนิท และนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีการแปรอุณหภูมิในการต้มเท่ากับ 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการต้ม 24 ชั่วโมง จากนั้นนำฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการต้มมาอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรด้วยวิธีแอนนิลลิงที่สภาวะต่าง ๆ มาวิเคราะห์ดังนี้

3.7.1 การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (*in vitro* digestibility)

การวิเคราะห์สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองของฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในข้อที่ 3.5.2

3.7.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ของฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในข้อที่ 3.5.3

3.7.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

3.8 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร

ฟลาวร์ข้าวทั้ง 6 ชนิดทั้งแบบดั้งเดิม (native) และฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการที่ส่งผลให้ฟลาวร์ข้าวมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุด จะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพดังต่อไปนี้

3.8.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของฟลาวร์ข้าวทั้ง 6 ชนิดทั้งแบบดั้งเดิม (native) และฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง differential Scanning Colorimeter (DSC) ทำได้โดยชั่งฟลาวร์ข้าวปริมาณ 3 มิลลิกรัมของน้ำหนักแห้งใส่ลงไปในถาดบรรจุตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ (aluminum pan) จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 9 ไมโครลิตร และปิดฝาถาดบรรจุตัวอย่างให้สนิท วางถาดบรรจุตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องข้ามคืนเพื่อให้ความชื้นภายในมีความสมดุล จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยการวางถาดบรรจุตัวอย่างลงในเครื่อง DSC ในส่วนของที่วางตัวอย่าง และวางถาดเปล่าอีกด้านหนึ่งเพื่อเป็นถาดอ้างอิง (reference pan) ถาดทั้งสองจะถูกให้ความร้อนโดยมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20°C จนถึง 120°C ซึ่งมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10°C ต่อนาที โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาทิไนเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (enthalpy, ΔH)

3.8.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด (pasting properties)

การวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด (pasting properties) ของฟลาวร์ข้าวทั้ง 6 ชนิดทั้งแบบดั้งเดิม (native) และฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดของแป้ง (rapid visco analyser, RVA) ทำได้โดยชั่งฟลาวร์ข้าวปริมาณ 3.5 กรัมใส่ลงในกระบอกอะลูมิเนียม จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 ± 0.1 มิลลิตร ใช้ใบพัดกวนให้ตัวอย่างกระจายตัวก่อนนำกระบอกอะลูมิเนียมใส่ในเครื่องวิเคราะห์ความหนืด โดยตั้งโปรแกรมเครื่องให้คงอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50°C และค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95°C และคงอุณหภูมิที่ 95°C จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึง 50°C และคงอุณหภูมิที่ 50°C บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าการคืนตัว (setback) โดยรายงานค่าต่าง ๆ ในหน่วย RVU

3.8.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวของฟลาวัวร์ข้าว

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวของฟลาวัวร์ข้าว สามารถทำได้โดย นำฟลาวัวร์ข้าว (0.5000 กรัม/น้ำหนักแห้ง) มาผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 2,288 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนใสออกอย่างระมัดระวัง ตะกอนที่ได้จากการเทส่วนใสจะถูกนำไปชั่งน้ำหนัก นอกจากนี้ ส่วนใสที่เทออกไปจะถูกนำไประเหยน้ำออกโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก

3.8.4 การส่องดูลักษณะของเม็ดฟลาวัวร์โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของเม็ดฟลาวัวร์ทำได้โดยทำการกระจาย ฟลาวัวร์ข้าวลงบน stub และทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำ จากนั้นนำไปส่องดูลักษณะของเม็ด ฟลาวัวร์โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.8.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และ ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความ เชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

3.9 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวดัดแปรในการทำขนมขอม่วง ที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

นำฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปรให้มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุดมาทดแทนฟลาวัวร์ข้าว แบบดั้งเดิมเพื่อแปรรูปเป็นขนมขอม่วง โดยอัตราส่วนของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวดัดแปรที่ ศึกษาคือ 100:0, 60:40, 50:50 และ 40:60 ซึ่งวิธีการทำขนมขอม่วงแสดงในภาพที่ 3.1 ก่อนโคที่มี อัตราส่วนของแป้งต่างกันจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ค่าดัชนีน้ำตาล และคุณภาพทาง ประสาทสัมผัส

3.9.1 การเตรียมโดก่อนนึ่งและหลังนึ่ง

3.9.1.1 การเตรียมโดก่อนนึ่ง นำโดขนมขอม่วงที่ได้จากการเตรียมดังภาพที่ 3.1 มา คลึงเป็นก้อนกลม โดยมีน้ำหนัก 3 กรัม นาน 3 วินาที พักไว้ที่อุณหภูมิห้อง 35 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและคุณภาพทางด้านสีดังข้อที่ 3.9.2 และ 3.9.3

3.9.1.2 การเตรียมโคหลังนึ่ง นำโคขนมขอม่วงที่ได้จากการเตรียมดังภาพที่ 3.1 มาคลึงเป็นก้อนกลม โดยมีน้ำหนัก 3 กรัม นาน 3 วินาที พักในอุณหภูมิห้อง 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปนึ่งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นพักไว้ 1 ชั่วโมง และนำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและคุณภาพทางด้านสีดังข้อที่ 3.9.2 และ 3.9.3

3.9.2 วิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

นำโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งที่เตรียมได้มาวิเคราะห์คุณภาพเนื้อสัมผัสเครื่อง Texture analyzer รุ่น TA.XT plus โดยทำการด้วยการวิเคราะห์แบบ Texture Profile Analysis ใช้หัววัดแบบ Cylinder ทรงกระบอก ขนาด 25 มิลลิเมตร (P/25) Pre-Test-Speed 1.00 mm/sec และ Post-Test-Speed 1.00 mm/sec โดยวัดแรงกด (compression) กดลงไปร้อยละ 90 วิเคราะห์ค่าความแข็ง (hardness) (กิโลกรัมแรง) ค่าแรงในการเกาะพื้นผิว (adhesiveness) (กิโลกรัมแรง.วินาที) ค่าความยืดหยุ่น (springiness) (มิลลิเมตร) และค่าแรงในการเกาะตัว (cohesiveness)

3.9.3 วิเคราะห์คุณภาพด้านสี

นำโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งมาวิเคราะห์ ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ด้วยระบบ Chroma meter ด้วยเครื่อง Minolta CR-400

3.9.4 วิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วงที่มีการทดแทนด้วยฟลาวาร์ข้าวคั่วดัดแปรมาทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยการประเมินแบบ 5 – point hedonic scale (1=ไม่ชอบมากที่สุด 2=ไม่ชอบ 3=เฉย ๆ 4=ชอบปานกลาง และ 5=ชอบมากที่สุด) ร่วมกับการทดสอบความชอบของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์โดยวัดความพอดี (Just About Right, JAR) (น้อยไป, พอดี และ มากไป) ด้านการกัดขาดของแป้งขณะเคี้ยว ความนุ่มของแป้งขณะเคี้ยว และความเหนียวของแป้งขณะเคี้ยว โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 30 คน

3.9.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI)

การวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ของขนมขอม่วงมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงในข้อที่ 3.5.3

3.9.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 16.0)

ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านประสาทสัมผัสทางด้านความชอบของขนมขอม่วง จะใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete Block

Design, RCBD) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ (SPSS 20.0) และวิเคราะห์ผลการประเมินความพอดีความพอดี (Just About Right, JAR) เป็นค่าร้อยละของจำนวนผู้ทดสอบที่ตอบในเกณฑ์ น้อยไป พอดี และมากเกินไป



ภาพที่ 3.1 การเตรียมผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาร์ข้าวตั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติการย่อยในหลอดทดลอง (in vitro digestibility)

ฟลาร์ข้าวตั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิไฮบริด ข้าวหอมมะลิสุรินทร์ ข้าวหอมมะลิเชียงราย ข้าวเสาไห้ชัยนาท และข้าวเสาไห้สระบุรี จะมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของปริมาณอะมิโลสของฟลาร์ข้าวต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (in vitro digestibility)

ฟลาร์ข้าว	อะมิโลส (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (in vitro digestibility)				ระดับของค่า GI
		RS (ร้อยละ)	RDS (ร้อยละ)	SDS (ร้อยละ)	GI	
ข้าวเหนียว	4.58 ^c ± 0.20	0.40 ^d ± 0.08	39.62 ^a ± 0.14	8.78 ^a ± 0.60	86.20 ^a ± 1.45	สูง
หอมมะลิไฮบริด	16.86 ^d ± 0.55	0.45 ^{cd} ± 0.17	38.69 ^b ± 0.37	7.29 ^b ± 0.22	84.65 ^c ± 0.26	สูง
หอมมะลิสุรินทร์	25.42 ^c ± 0.37	0.62 ^{cd} ± 0.08	36.84 ^c ± 0.29	7.16 ^b ± 0.50	85.71 ^b ± 0.21	สูง
หอมมะลิเชียงราย	25.13 ^c ± 0.60	0.71 ^c ± 0.21	35.84 ^d ± 0.56	7.19 ^b ± 0.13	85.44 ^{bc} ± 0.06	สูง
เสาไห้ชัยนาท	36.56 ^b ± 0.37	1.26 ^a ± 0.35	34.45 ^c ± 1.02	5.80 ^c ± 0.46	82.60 ^d ± 0.55	สูง
เสาไห้สระบุรี	37.74 ^a ± 0.29	1.00 ^b ± 0.16	34.10 ^c ± 0.31	5.81 ^c ± 0.17	82.73 ^d ± 1.57	สูง

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากงานวิจัยของ Miller และคณะ (1992) ได้รายงานว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำจะมีปริมาณอะมิโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 12 – 20 โดยน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ข้าวที่มีอะมิโลสปานกลางจะมีปริมาณอะมิโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 20 – 25 โดยน้ำหนักแห้ง และข้าวที่มีอะมิโลสสูงจะมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสของฟลาร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1 จะพบว่าข้าวเหนียวจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสน้อยมาก ในขณะที่ข้าวหอมมะลิไฮบริดจัดเป็นข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ ข้าวหอมมะลิสุรินทร์ และข้าวหอมมะลิเชียงราย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเป็นข้าวที่มีอะมิโลสปานกลาง และข้าวเสาไห้ชั้นนาท และข้าวเสาไห้สระบุรีจัดเป็นข้าวที่มีอะมิโลสสูง ซึ่งปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกันในฟลาร์ข้าวแต่ละสายพันธุ์นี้จะส่งผลต่อค่าการย่อยและค่าดัชนีน้ำตาล โดยจะพบว่าฟลาร์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ได้แก่ข้าวเสาไห้ชั้นนาท และข้าวเสาไห้สระบุรี จะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) สูง และมีปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) ต่ำ เมื่อเทียบกับข้าวที่มีอะมิโลสปานกลางและต่ำ ในขณะที่ข้าวที่มีอะมิโลสปานกลางและต่ำจะมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยช้า (SDS) สูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu และคณะ (2004) ที่ได้รายงานไว้ว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง นอกจากนี้ Hoover และ Zhou (2003) ได้อธิบายผลของปริมาณอะมิโลสต่อค่าการย่อยว่า อะมิโลสภายในฟลาร์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากกว่าอะมิโลเพกติน เมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลของข้าวชนิดต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าดัชนีน้ำตาลมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะมิโลส และปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ เช่นกัน โดยข้าวที่มีอะมิโลสสูง หรือมีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง จะมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ซึ่ง Miller และคณะ (1992) ได้รายงานไว้ว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ เนื่องจากข้าวชนิดนี้ประกอบด้วยสตาร์ชทนย่อยในปริมาณมาก ซึ่งเอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากขึ้น ค่าการย่อยลดลง จึงทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลมีค่าต่ำ

4.2 ผลของการดัดแปรฟลาร์ข้าวโดยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล

ฟลาร์ข้าวดั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิยโสธร ข้าวหอมมะลิสุนทร ข้าวหอมมะลิเชียงราย ข้าวเสาไห้ชั้นนาท และข้าวเสาไห้สระบุรีถูกดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (heat-moisture treatment, HMT) โดยจะมีการแปรปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาร์ข้าวโดยการเติมน้ำ เพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 20, 25 และ 30 ก่อนที่จะทำฟลาร์ข้าวไปบ่ม และให้ความร้อน โดยสมบัติทางกายภาพในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาร์ข้าวที่ถูกดัดแปรด้วยสภาวะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาวัวร์ข้าวในการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง

ฟลาวัวร์ข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)				ระดับของ ค่า GI
		RS (ร้อยละ)	RDS (ร้อยละ)	SDS (ร้อยละ)	GI	
ข้าวเหนียว	20	1.39 ^a ± 0.07	24.10 ^a ± 0.56	21.86 ^a ± 1.06	61.71 ^a ± 0.19	ปานกลาง
	25	1.56 ^a ± 0.10	23.20 ^b ± 0.86	20.96 ^b ± 0.24	60.98 ^b ± 0.27	ปานกลาง
	30	1.61 ^a ± 0.07	22.97 ^c ± 0.64	20.60 ^b ± 0.24	60.48 ^b ± 0.50	ปานกลาง
หอมมะลิไซธร	20	5.34 ^a ± 0.42	23.04 ^a ± 1.41	18.32 ^a ± 0.22	59.15 ^a ± 0.10	ปานกลาง
	25	5.49 ^a ± 0.15	22.17 ^b ± 0.17	17.97 ^b ± 0.32	57.86 ^b ± 0.50	ปานกลาง
	30	5.98 ^a ± 0.57	21.84 ^c ± 0.61	16.82 ^c ± 0.14	57.04 ^b ± 1.66	ปานกลาง
หอมมะลิสุรินทร์	20	10.95 ^a ± 0.71	24.34 ^a ± 0.26	17.90 ^a ± 0.55	56.05 ^a ± 0.05	ปานกลาง
	25	11.23 ^a ± 0.77	23.34 ^b ± 0.63	17.06 ^a ± 1.13	55.48 ^b ± 0.07	ต่ำ
	30	11.42 ^a ± 0.08	22.39 ^c ± 0.53	16.17 ^b ± 0.78	55.46 ^b ± 0.04	ต่ำ
หอมมะลิเชียงราย	20	11.93 ^a ± 0.38	23.91 ^a ± 0.85	17.88 ^a ± 1.20	55.94 ^a ± 0.53	ต่ำ
	25	11.74 ^a ± 0.39	23.29 ^a ± 1.09	17.26 ^a ± 0.52	55.28 ^a ± 0.98	ต่ำ
	30	12.06 ^a ± 0.36	22.08 ^b ± 1.08	16.07 ^b ± 0.55	54.24 ^b ± 0.49	ต่ำ
เสาไห้ชัยนาท	20	15.73 ^b ± 0.79	23.68 ^a ± 0.08	17.64 ^a ± 0.32	52.16 ^a ± 0.49	ต่ำ
	25	16.16 ^{ab} ± 0.20	23.30 ^a ± 0.16	16.41 ^b ± 0.32	51.79 ^b ± 0.15	ต่ำ
	30	16.68 ^a ± 0.15	22.96 ^b ± 0.89	15.27 ^c ± 0.24	51.55 ^b ± 0.49	ต่ำ
เสาไห้สระบุรี	20	14.68 ^c ± 0.15	23.22 ^a ± 0.16	18.82 ^a ± 1.41	51.74 ^a ± 0.09	ต่ำ
	25	15.53 ^b ± 0.26	22.12 ^b ± 0.16	18.02 ^a ± 0.52	51.57 ^a ± 0.04	ต่ำ
	30	16.64 ^a ± 0.18	21.58 ^c ± 0.72	16.70 ^b ± 0.73	51.23 ^a ± 0.45	ต่ำ

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นของฟลาวัวร์ข้าวที่แตกต่างกันส่งผลให้สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองแตกต่างกัน โดยการตัดแปรที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงจะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ทชนย่อย (RS) สูงกว่าการตัดแปรที่มีปริมาณความชื้นต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นของฟลาร์ข้าวเท่ากับร้อยละ 30 จะส่งผลให้มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยซ้ำ (SDS) และสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) มีค่าน้อยกว่าฟลาร์ข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 20 ซึ่งผลข้างต้นสอดคล้องกับค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ที่ลดลงเมื่อฟลาร์มีความชื้นร้อยละ 30 โดยจากงานวิจัยของ Jacobs และ Delcour (1998) ได้รายงานว่า ปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการคัดแปรด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น คือ ระดับความชื้นเริ่มต้นของสตาร์ช อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการคัดแปร นอกจากนี้ Li และคณะ (2011) ได้มีการศึกษาการคัดแปรสตาร์ชถั่วเขียวด้วยกระบวนการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นโดยให้ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในการคัดแปรเท่ากับร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 ที่ความร้อน 120 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าสตาร์ชถั่วเขียวที่มีความชื้นร้อยละ 20 มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยมากที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งจะยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเมื่อให้ความร้อนเข้าไป พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งคูลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลให้การย่อยลดลง (BeMiller, 2018) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟลาร์ข้าวชนิดต่าง ๆ พบว่าการคัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะส่งผลต่อการลดค่าดัชนีน้ำตาลในฟลาร์ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า

จากการทดลองนี้ พบว่าการคัดแปรฟลาร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นสามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาลเมื่อเปรียบเทียบกับฟลาร์ข้าวดั้งเดิม โดยการปรับให้ความชื้นเริ่มต้นของฟลาร์ข้าวที่มีปริมาณร้อยละ 30 จะส่งผลให้มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยมากที่สุด

4.3 ผลของการคัดแปรฟลาร์ข้าวโดยวิธีการแอนนิลลิงเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาล

ฟลาร์ข้าวดั้งเดิมชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิไฮสตร ข้าวหอมมะลิสุรินทร์ ข้าวหอมมะลิเชียงราย ข้าวเสาไห้ชัยนาท และข้าวเสาไห้สระบุรีถูกคัดแปรด้วยวิธีแอนนิลลิง (annealing, ANN) โดยมีการแปรอุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาร์ข้าวที่ถูกคัดแปรด้วยสภาวะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิในการตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิงต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง

ฟลาวัวร์ข้าว	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	สมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง (<i>in vitro</i> digestibility)				ระดับของ ค่า GI
		RS (ร้อยละ)	RDS (ร้อยละ)	SDS (ร้อยละ)	GI	
ข้าวเหนียว	45	9.83 ^b ± 1.27	34.44 ^c ± 1.01	78.08 ^b ± 1.03	80.42 ^b ± 0.42	สูง
	50	11.85 ^a ± 0.18	44.60 ^a ± 1.02	82.36 ^a ± 0.11	76.02 ^c ± 0.37	สูง
	55	10.28 ^{ab} ± 0.83	44.73 ^a ± 0.89	79.57 ^b ± 2.18	83.98 ^a ± 0.63	สูง
หอมมะลิโสธร	45	13.12 ^a ± 1.33	37.86 ^a ± 1.37	44.61 ^b ± 0.36	76.25 ^a ± 1.03	สูง
	50	12.81 ^a ± 0.21	34.51 ^b ± 0.55	68.09 ^a ± 1.39	72.37 ^b ± 0.46	สูง
	55	12.21 ^a ± 0.93	32.75 ^c ± 0.70	45.28 ^b ± 1.30	71.51 ^b ± 0.33	สูง
หอมมะลิสุรินทร์	45	12.94 ^b ± 0.78	30.83 ^b ± 0.02	52.25 ^a ± 2.85	74.89 ^b ± 1.56	สูง
	50	15.55 ^a ± 1.03	31.29 ^b ± 1.62	43.14 ^b ± 1.61	77.28 ^a ± 0.04	สูง
	55	16.24 ^a ± 1.18	32.66 ^a ± 0.03	52.25 ^a ± 2.85	71.99 ^c ± 0.28	สูง
หอมมะลิเชียงราย	45	10.94 ^{ab} ± 0.20	40.00 ^c ± 0.16	70.37 ^a ± 0.99	78.34 ^a ± 0.47	สูง
	50	10.42 ^b ± 1.68	41.99 ^b ± 0.12	44.37 ^c ± 1.03	70.27 ^b ± 0.82	สูง
	55	12.83 ^a ± 1.29	43.40 ^a ± 1.31	44.99 ^b ± 0.70	71.43 ^b ± 1.11	สูง
เสาไห้ชัยนาท	45	17.55 ^b ± 0.58	34.47 ^c ± 1.17	46.58 ^a ± 1.82	70.84 ^a ± 0.40	สูง
	50	15.95 ^c ± 0.96	37.14 ^b ± 1.20	45.25 ^a ± 0.53	69.97 ^a ± 0.74	ปานกลาง
	55	18.76 ^a ± 0.77	40.14 ^a ± 0.70	40.58 ^b ± 1.82	69.91 ^a ± 0.31	ปานกลาง
เสาไห้สระบุรี	45	18.76 ^b ± 0.01	30.42 ^b ± 0.16	40.69 ^a ± 1.57	76.53 ^a ± 2.51	สูง
	50	14.27 ^c ± 0.30	33.65 ^a ± 0.54	39.68 ^b ± 1.63	65.82 ^b ± 1.03	ปานกลาง
	55	28.14 ^a ± 0.24	35.27 ^a ± 1.74	37.89 ^c ± 0.43	64.53 ^b ± 1.24	ปานกลาง

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มฟลาวัวร์ข้าวในขั้นตอนการตัดแปรด้วยวิธีแอนนิลลิงจะส่งผลต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลอง และค่าดัชนีน้ำตาล โดยการใช้อุณหภูมิสูงในขั้นตอนการบ่มจะส่งผลให้ฟลาวัวร์ข้าวมีปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวที่มีอะมิโลสสูง (ข้าวเสาไห้สระบุรี) การบ่มที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสช่วยเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อทำการดัดแปรฟลาวร์ข้าวโดยการบ่มที่อุณหภูมิสูง ขั้นตอนนี้จะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีลักษณะเป็นผลึก ซึ่งทำให้ปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) มีค่าสูง (Jacobs และ Delcour, 1998; Stute, 1992) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร พบว่ามีความสัมพันธ์ปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ โดยข้าวเสาไห้สระบุรีที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุด เนื่องมาจากมีปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) มากที่สุด

จากการทดลองนี้ พบว่าการดัดแปรฟลาวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิงสามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย และลดค่าดัชนีน้ำตาลเมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวร์ข้าวดั้งเดิม อย่างไรก็ตามการดัดแปรด้วยวิธีนี้จะส่งผลให้ฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงถึงระดับปานกลางเท่านั้นในข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะพบว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการลดค่าดัชนีน้ำตาลมากกว่า เนื่องมาจากฟลาวร์ข้าวที่ดัดแปรด้วยวิธีการนี้มีค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้นจึงเลือกฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นมาศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพในหัวข้อถัดไป

4.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร

จากการศึกษาผลของการดัดแปรฟลาวร์ข้าวด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อสมบัติทางการย่อยในหลอดทดลองและค่าดัชนีน้ำตาลในข้อที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะส่งผลให้มีการลดค่าดัชนีน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงได้เลือกฟลาวร์ที่ได้จากการดัดแปรด้วยวิธีนี้มาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความหนืด ความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัว และการดูลักษณะของเม็ดฟลาวร์โดยการใช้อัลตราไมโครสโคปแบบส่องกราด

4.4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร

ฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นในสถานะต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลในเซชัน (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลในเซชัน (conclusion temperature, T_c) และพลังงานในการเกิดเจลในเซชัน (enthalpy, ΔH) ซึ่งผลแสดงอยู่ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของฟลาวร์ข้าวดั้งเดิมและฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้น

ฟลาวร์ข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	T _o (องศาเซลเซียส)	T _p (องศาเซลเซียส)	T _c (องศาเซลเซียส)	ΔH (จูลต่อกรัม)
ข้าวเหนียว	ดั้งเดิม	60.97 ^{ab} ± 0.21	69.15 ^b ± 0.09	77.69 ^b ± 0.58	2.76 ^b ± 0.54
	20	61.31 ^{ab} ± 0.48	68.84 ^c ± 0.08	78.54 ^b ± 1.33	2.44 ^b ± 0.42
	25	60.71 ^b ± 0.11	68.67 ^c ± 0.00	78.35 ^b ± 0.03	2.96 ^{ab} ± 0.07
	30	62.27 ^a ± 1.36	71.62 ^a ± 0.28	82.77 ^a ± 0.33	3.72 ^a ± 0.25
หอมมะลิโยธินธร	ดั้งเดิม	63.39 ^b ± 0.08	70.37 ^b ± 0.06	78.93 ^{bc} ± 0.24	3.27 ^a ± 0.26
	20	63.34 ^b ± 1.71	69.83 ^c ± 0.10	77.32 ^c ± 3.21	3.02 ^a ± 0.15
	25	63.24 ^b ± 0.07	70.50 ^b ± 0.00	80.98 ^{ab} ± 0.36	3.14 ^a ± 0.28
	30	65.25 ^a ± 0.01	72.96 ^a ± 0.10	82.27 ^a ± 1.30	2.88 ^a ± 0.43
หอมมะลิสุนทรินทร์	ดั้งเดิม	64.74 ^b ± 0.29	70.87 ^b ± 0.18	78.54 ^c ± 0.96	3.22 ^a ± 0.22
	20	64.78 ^b ± 0.35	71.13 ^b ± 0.54	80.66 ^b ± 1.54	2.37 ^b ± 0.53
	25	65.39 ^b ± 0.75	74.33 ^a ± 3.99	86.83 ^a ± 7.78	2.81 ^b ± 0.36
	30	66.31 ^a ± 0.01	73.00 ^a ± 0.11	81.92 ^b ± 0.11	2.93 ^{ab} ± 0.08

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของฟลาวร์ข้าวดั้งเดิมและฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้น (ต่อ)

ฟลาวร์ข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	T _o (องศาเซลเซียส)	T _p (องศาเซลเซียส)	T _c (องศาเซลเซียส)	ΔH (จูลต่อกรัม)
หอมมะลิเชิงราย	ดั้งเดิม	63.44 ^b ± 0.08	70.51 ^{bc} ± 0.12	78.91 ^b ± 0.11	2.89 ^a ± 0.37
	20	62.64 ^c ± 0.38	70.03 ^c ± 0.28	80.76 ^b ± 1.05	2.19 ^b ± 0.79
	25	62.85 ^c ± 0.45	70.96 ^b ± 0.65	83.89 ^a ± 1.38	3.07 ^a ± 0.12
	30	65.44 ^a ± 0.32	73.54 ^a ± 0.04	84.06 ^a ± 1.61	2.87 ^a ± 0.32
เสาให้ชยันต	ดั้งเดิม	62.56 ^b ± 0.07	68.92 ^b ± 0.00	77.72 ^b ± 0.07	2.88 ^a ± 0.00
	20	62.95 ^b ± 0.19	73.28 ^a ± 4.43	82.11 ^{ab} ± 0.26	1.48 ^b ± 0.32
	25	69.29 ^a ± 8.39	73.70 ^a ± 4.17	79.05 ^{ab} ± 8.61	2.73 ^a ± 0.57
	30	67.93 ^{ab} ± 0.65	75.62 ^a ± 2.17	84.21 ^a ± 1.13	2.72 ^a ± 0.04
เสาให้สระบุรี	ดั้งเดิม	70.28 ^c ± 0.73	77.44 ^b ± 0.16	91.30 ^b ± 4.37	3.43 ^a ± 0.99
	20	67.75 ^b ± 0.44	76.95 ^b ± 0.17	91.01 ^b ± 3.14	3.08 ^a ± 0.21
	25	65.91 ^d ± 0.03	77.16 ^b ± 0.00	92.25 ^a ± 0.12	3.06 ^a ± 0.07
	30	71.20 ^a ± 0.00	78.67 ^a ± 0.00	90.68 ^b ± 0.07	3.05 ^a ± 0.07

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.4 พบว่าการตัดแปรโดยใช้วิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_0) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_p) และอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_c) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นเริ่มต้น นอกจากนี้พลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น เกิดการจับกันเป็นโครงสร้างแบบเกลียวคู่ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในการตัดแปร จึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการสลายโครงสร้างเกลียวคู่ ดังนั้นการเกิดโครงสร้างที่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้นนี้จึงส่งผลให้ฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มขึ้น และมีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง เนื่องจากเอนไซม์เข้าไปย่อยได้ยากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟลาวร์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรกับฟลาวร์ที่ผ่านการตัดแปร จะพบว่าฟลาวร์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีค่า T_0 น้อยกว่าฟลาวร์ที่ผ่านการตัดแปร โดยให้มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Khunae และคณะ (2007) ที่พบว่าการตัดแปรโดยใช้วิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นสามารถเพิ่มค่า T_0 ของสตาร์ชข้าวได้เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวดั้งเดิม โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน สามารถบ่งบอกถึงการจับกันระหว่างสายอะมิโลสกับสายอะมิโลสกันเอง หรือเกิดการจับกันระหว่างสายอะมิโลสกับไขมัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น

4.4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความหนืดของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปร

ฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นในสภาวะต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติทางความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด (PV) ค่าความหนืดต่ำสุด (TV) ค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (BD) ค่าความหนืดสุดท้าย (FV) ค่าการคืนตัว (SB) และอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (PT) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความหนืดของฟลาวร์ข้าวตั้งเดิมและฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้น

ฟลาวร์ข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	PT (°C)	PV (RVU)	TV (RVU)	FV (RVU)	BD (RVU)	SB (RVU)
ข้าวเหนียว	ตั้งเดิม	69.85 ^{bc} ± 1.77	296.05 ^c ± 0.92	199.05 ^c ± 1.77	250.85 ^c ± 2.33	97.00 ^a ± 0.99	51.80 ^b ± 0.57
	20	69.30 ^c ± 3.39	465.12 ^a ± 5.01	364.12 ^a ± 9.36	441.58 ^a ± 6.48	101.00 ^a ± 4.35	77.46 ^a ± 2.88
	25	71.82 ^{ab} ± 2.36	463.41 ^a ± 4.82	364.91 ^a ± 18.85	442.46 ^a ± 3.47	98.50 ^a ± 14.02	77.54 ^a ± 15.37
	30	73.40 ^a ± 0.07	427.75 ^b ± 0.70	322.58 ^b ± 1.29	389.95 ^b ± 1.59	105.16 ^a ± 0.58	67.37 ^a ± 0.28
หอมมะลิยโสธร	ตั้งเดิม	85.20 ^a ± 0.57	355.50 ^a ± 1.13	278.95 ^b ± 0.64	469.15 ^b ± 2.62	76.50 ^a ± 0.43	190.20 ^b ± 1.98
	20	85.15 ^a ± 1.62	345.29 ^a ± 2.53	337.54 ^a ± 2.65	593.17 ^a ± 1.41	7.75 ^c ± 0.11	255.62 ^a ± 1.23
	25	84.77 ^a ± 1.16	346.25 ^a ± 3.18	331.00 ^a ± 2.82	586.87 ^a ± 2.53	15.25 ^c ± 0.35	255.87 ^a ± 0.28
	30	82.32 ^b ± 2.36	352.17 ^a ± 36.06	326.33 ^a ± 26.04	581.96 ^a ± 25.86	25.83 ^b ± 10.01	255.62 ^a ± 0.17
หอมมะลิสุรินทร์	ตั้งเดิม	84.35 ^b ± 0.64	362.45 ^a ± 5.44	253.25 ^{ab} ± 3.75	423.65 ^c ± 4.32	109.15 ^a ± 1.63	170.40 ^b ± 0.57
	20	86.05 ^a ± 0.70	287.00 ^c ± 12.26	282.45 ^a ± 12.19	548.50 ^{ab} ± 18.97	4.54 ^c ± 0.05	266.04 ^a ± 6.77
	25	82.67 ^b ± 1.80	294.21 ^b ± 7.72	286.79 ^a ± 5.71	550.00 ^a ± 4.59	7.41 ^b ± 2.01	263.21 ^a ± 1.11
	30	84.27 ^b ± 0.45	277.83 ^c ± 0.58	220.41 ^b ± 71.53	532.21 ^b ± 6.66	7.41 ^b ± 0.23	259.79 ^a ± 3.05

หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความหนืดของฟลาวร์ข้าวคั่วดั้งเดิมและฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้น (ต่อ)

ฟลาวร์ข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	PT (°C)	PV (RVU)	TV (RVU)	FV (RVU)	BD (RVU)	SB (RVU)
หอมมะลิเชิงราย	ดั้งเดิม	84.00 ^b ± 0.00	358.25 ^a ± 0.21	276.80 ^a ± 0.28	454.00 ^c ± 1.98	81.45 ^a ± 0.07	177.20 ^c ± 2.27
	20	84.70 ^a ± 1.20	264.17 ^b ± 2.12	259.95 ^b ± 1.59	546.58 ^a ± 2.59	4.20 ^d ± 0.53	286.62 ^a ± 0.99
	25	83.92 ^{ab} ± 0.03	225.67 ^b ± 81.31	266.37 ^{ab} ± 11.7	550.71 ^a ± 12.07	9.29 ^c ± 1.11	284.33 ^b ± 0.35
	30	81.45 ^b ± 4.52	243.83 ^b ± 15.08	230.45 ^c ± 14.67	514.71 ^b ± 14.90	13.37 ^b ± 0.41	284.25 ^b ± 0.24
เส้าให้ชัณนาท	ดั้งเดิม	87.55 ^b ± 0.64	191.05 ^a ± 5.16	189.25 ^a ± 4.88	420.25 ^a ± 4.03	1.80 ^c ± 0.28	231.05 ^a ± 8.84
	20	89.27 ^a ± 0.60	114.42 ^c ± 1.06	105.46 ^c ± 1.71	236.12 ^c ± 5.12	8.96 ^a ± 0.65	130.66 ^b ± 3.41
	25	89.15 ^a ± 0.56	123.96 ^c ± 1.82	115.25 ^c ± 1.65	246.46 ^{bc} ± 2.18	8.71 ^a ± 0.18	131.20 ^b ± 0.53
	30	88.00 ^b ± 1.20	145.29 ^b ± 20.91	139.29 ^b ± 20.56	268.67 ^b ± 43.97	6.00 ^d ± 0.36	129.37 ^b ± 23.39
เส้าให้สระบุรี	ดั้งเดิม	91.25 ^a ± 0.07	112.55 ^a ± 0.07	98.25 ^b ± 1.06	249.20 ^a ± 0.28	14.30 ^a ± 0.99	150.95 ^a ± 1.35
	20	91.62 ^a ± 0.67	89.05 ^c ± 0.17	78.83 ^d ± 1.06	168.58 ^c ± 1.76	10.20 ^b ± 0.88	89.75 ^c ± 0.70
	25	89.55 ^{ab} ± 1.06	114.87 ^a ± 3.59	108.54 ^a ± 3.00	208.42 ^b ± 3.18	6.33 ^c ± 0.58	99.87 ^b ± 6.18
	30	82.30 ^b ± 8.06	93.25 ^b ± 0.82	87.75 ^c ± 0.24	154.37 ^b ± 1.35	5.50 ^c ± 0.59	66.62 ^d ± 1.12

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.5 พบว่าการตัดแปรรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะส่งผลให้ค่าความเหน็ดสูงสุด (PV) และค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (BD) ของฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวร์ข้าวดั้งเดิม ยกเว้นฟลาวร์ข้าวเหนียวที่มีค่า PV และ BD เพิ่มขึ้น เมื่อทำการตัดแปรร โดย Zavareze และคณะ (2010) ได้ทำการตัดแปรรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น และพบว่าค่า PV และ BD ของสตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรรมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปรรเช่นกัน โดยความเหน็ดที่มีค่าลดลงนี้ เนื่องมาจากคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวลดลง ซึ่งเป็นผลของกระบวนการตัดแปรรแบบให้ความร้อนร่วมกับความชื้นที่มีต่อเม็ดสตาร์ช (Hormdok และ Noomhorm, 2007) นอกจากนี้กระบวนการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นยังส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรง และทนต่อแรงกวนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องมาจากค่า BD ของสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรมีค่าลดลง (Olayinka และคณะ 2008) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของความชื้นในการตัดแปรรฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ จะพบว่าค่า PV ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อมีการแปรปริมาณความชื้นของฟลาวร์ข้าวหอมมะลิ ยโสธร และหอมมะลิเชิงทราย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณความชื้นของฟลาวร์ข้าวเสาไห้ชยันนาท และเสาไห้สระบุรี ส่งผลให้ค่า PV มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

4.4.3 ผลของการวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวของฟลาวร์ข้าว ฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น ในสภาวะต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย และกำลังการพองตัวดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยพบว่าการตัดแปรรฟลาวร์ข้าวเหนียว ข้าวหอมมะลิยโสธร ข้าวหอมมะลิสุนทร ข้าวเสาไห้ชยันนาท โดยให้ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 30 ส่งผลให้ฟลาวร์ข้าวมีค่าการละลายดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวร์ข้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปรร อย่างไรก็ตามการตัดแปรรฟลาวร์ข้าวหอมมะลิเชิงทราย และข้าวเสาไห้สระบุรี ไม่ได้ทำให้ค่าการละลายแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวร์ข้าวดั้งเดิม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hormdok และ Noomhorm (2007) ที่พบว่าค่าการละลายไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรร และสตาร์ชข้าวดั้งเดิม เมื่อพิจารณากำลังการพองตัวของฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ (ตารางที่ 4.6) พบว่าการตัดแปรรฟลาวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นส่งผลต่อกำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชเพียงเล็กน้อย โดยค่ากำลังการพองตัวของฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปรรจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวร์ข้าวดั้งเดิม

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัวของของฟลาร์ข้าวต่าง ๆ

ฟลาร์ข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	การละลาย (ร้อยละ)	กำลังการพองตัว (ร้อยละ)
ข้าวเหนียว	ดั้งเดิม	$9.15^b \pm 0.87$	$0.10^b \pm 0.01$
	20	$9.97^{ab} \pm 0.25$	$0.12^a \pm 0.04$
	25	$10.98^a \pm 0.84$	$0.12^a \pm 0.01$
	30	$10.51^a \pm 0.02$	$0.13^a \pm 0.01$
หอมมะลิโสธร	ดั้งเดิม	$6.04^c \pm 1.93$	$0.09^b \pm 0.05$
	20	$6.39^c \pm 0.97$	$0.09^b \pm 0.07$
	25	$9.25^b \pm 1.01$	$0.10^a \pm 0.03$
	30	$14.94^a \pm 1.70$	$0.10^a \pm 0.06$
หอมมะลิสุรินทร์	ดั้งเดิม	$7.10^b \pm 0.39$	$0.09^b \pm 0.02$
	20	$7.44^b \pm 0.36$	$0.09^b \pm 0.06$
	25	$6.02^b \pm 0.56$	$0.10^a \pm 0.03$
	30	$10.22^a \pm 1.34$	$0.10^a \pm 0.01$
หอมมะลิเชียงราย	ดั้งเดิม	$6.91^a \pm 1.43$	$0.10^a \pm 0.04$
	20	$7.27^a \pm 0.79$	$0.10^a \pm 0.02$
	25	$8.16^a \pm 1.80$	$0.10^a \pm 0.04$
	30	$6.83^a \pm 1.34$	$0.09^b \pm 0.03$
เสาไห้ชัยนาท	ดั้งเดิม	$8.01^b \pm 1.77$	$0.09^a \pm 0.03$
	20	$8.41^b \pm 1.01$	$0.08^b \pm 0.01$
	25	$7.62^c \pm 1.26$	$0.08^b \pm 0.01$
	30	$9.42^a \pm 0.87$	$0.09^a \pm 0.01$
เสาไห้สระบุรี	ดั้งเดิม	$6.63^a \pm 1.08$	$0.08^a \pm 0.03$
	20	$6.61^a \pm 1.19$	$0.08^a \pm 0.02$
	25	$7.21^a \pm 0.42$	$0.08^a \pm 0.01$
	30	$7.56^a \pm 0.59$	$0.08^a \pm 0.03$

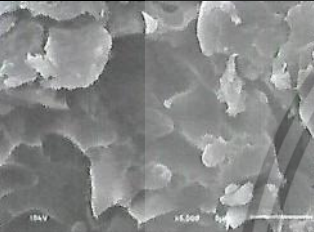
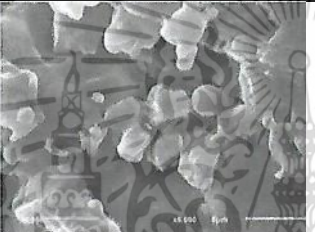
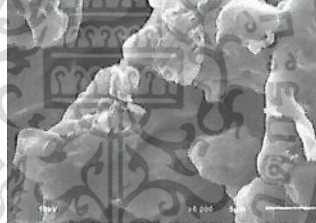
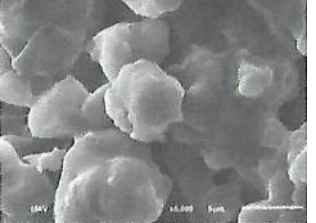
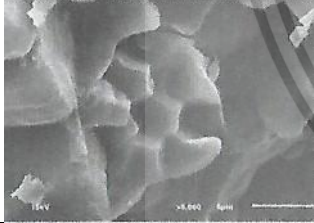
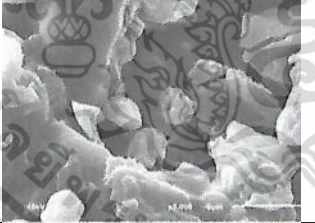
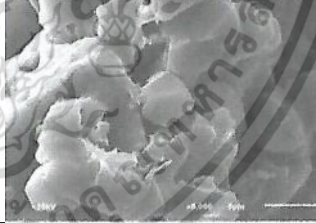
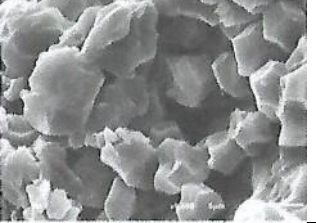
หมายเหตุ: ^{a-c} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของข้าวชนิดเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

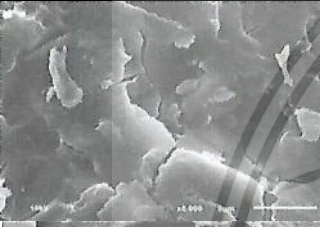
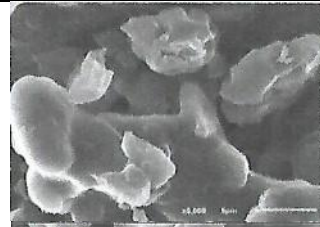
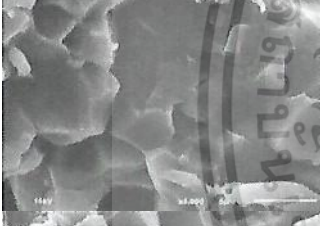
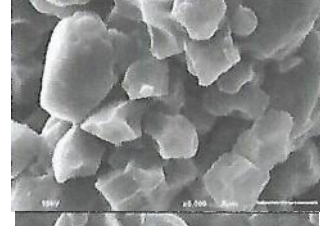
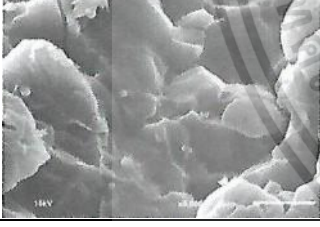
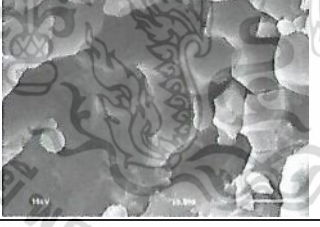
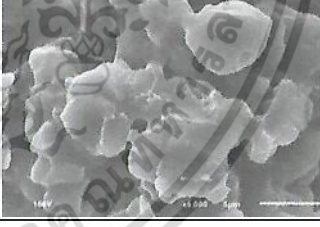
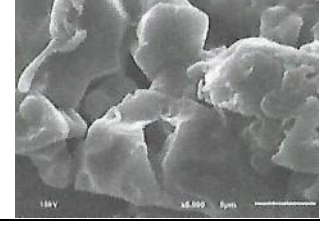
4.4.4 ผลการส่งคุณลักษณะของเมล็ดพลาว์โดยใช้กล้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด

พลาว์ข้าวชนิดต่าง ๆ แบบดั้งเดิม และที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความร้อนชื้นในสภาวะต่าง ๆ ถูกนำมาส่งเพื่อคุณลักษณะของเมล็ดแป้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยพบว่าเมล็ดแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะมีความเป็นเหล็มนมากกว่าเมล็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปร ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของเมล็ดแป้งข้าว การดัดแปรพลาว์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะส่งผลกระทบต่อลักษณะของเมล็ดแป้ง โดยเมล็ดแป้งจะมีความบวมพอง และความเป็นเหล็มนจะหายไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zavareze และคณะ (2010) ที่พบว่าเมล็ดสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นจะมีลักษณะกลมและพองตัวเพิ่มขึ้น โดยที่ความเป็นเหล็มนจะหายไป ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเมล็ดสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทิไนเซชันบางส่วน ดังนั้น กระบวนการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นในการทดลองนี้จะส่งผลให้เมล็ดแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ เกิดเจลาทิไนเซชันบางส่วน

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของเม็ดแป้งที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น

ชนิดข้าว	ไม่ผ่านการตัดแปร	ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อน ร่วมกับความชื้นร้อยละ 20	ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อน ร่วมกับความชื้นร้อยละ 25	ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อน ร่วมกับความชื้นร้อยละ 30
ข้าวเหนียว				
หอมมะลิไฮสตร				
หอมมะลิสุรินทร์				

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของเม็ดแป้งที่ไม่ผ่านและผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (ต่อ)

ชนิดข้าว	ไม่ผ่านการตัดแปร	ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อน ร่วมกับความชื้นร้อยละ 20	ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการให้ความ ร้อนร่วมกับความชื้นร้อยละ 25	ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อน ร่วมกับความชื้นร้อยละ 30
หอมมะลิเชิงราช				
เสาให้ชัยนาท				
เสาให้สระบุรี				

4.5 ผลของการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวดัดแปรในการทำขนมขอม่วงที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

ฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร โดยมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำที่สุด (วิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นร้อยละ 30) จะถูกนำมาทดแทนฟลาวัวร์ข้าวเจ้าดั้งเดิมในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อแปรูปเป็นขนมขอม่วงที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลง โดยอัตราส่วนของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวดัดแปรที่ศึกษา คือ 100:0, 60:40, 50:50 และ 40:60 โดยจะมีการวิเคราะห์คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส สี คุณภาพทางประสาทสัมผัส และค่าดัชนีน้ำตาลของก้อนโดที่ได้จากการผสมแป้งในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

4.5.1 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส โดก่อนนึ่งและหลังนึ่งของขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร

ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของโดก่อนนึ่งและหลังนึ่งของขนมขอม่วงที่ทดแทนด้วยฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส โดก่อนนึ่งและหลังนึ่งของขนมขอม่วงที่ทดแทนด้วยฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการดัดแปร

	อัตราส่วน ฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม: ฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการดัดแปร	ค่าความแข็ง (กิโลกรัมแรง)	ค่าแรงในการเกาะ พื้นผิว (กิโลกรัมแรง.วินาที)	ค่าความยืดหยุ่น (มิลลิเมตร)	ค่าแรงในการ เกาะตัว
ก่อนนึ่ง	100:0	2,487.6 ^d ± 91.8	1,660.2 ^a ± 35.4	0.42 ^a ± 0.00	0.43 ^a ± 0.00
	60:40	3,137.9 ^c ± 74.4	1,092.1 ^b ± 76.5	0.35 ^b ± 0.00	0.28 ^b ± 0.00
	50:50	3,441.8 ^b ± 36.7	784.9 ^c ± 1.5	0.31 ^c ± 0.00	0.23 ^c ± 0.00
	40:60	3,964.0 ^a ± 55.5	558.5 ^d ± 5.9	0.22 ^d ± 0.00	0.20 ^d ± 0.00
หลังนึ่ง	100:0	2,083.3 ^d ± 71.8	2,011.7 ^a ± 11.5	0.32 ^a ± 0.00	0.72 ^a ± 0.01
	60:40	2,529.6 ^c ± 25.4	1,813.2 ^b ± 45.7	0.26 ^b ± 0.01	0.63 ^b ± 0.01
	50:50	3,158.6 ^b ± 85.5	1,143.8 ^c ± 12.4	0.25 ^b ± 0.00	0.53 ^c ± 0.01
	40:60	3,516.0 ^a ± 60.5	839.9 ^d ± 5.8	0.18 ^c ± 0.00	0.41 ^d ± 0.01

หมายเหตุ: ^{a-d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



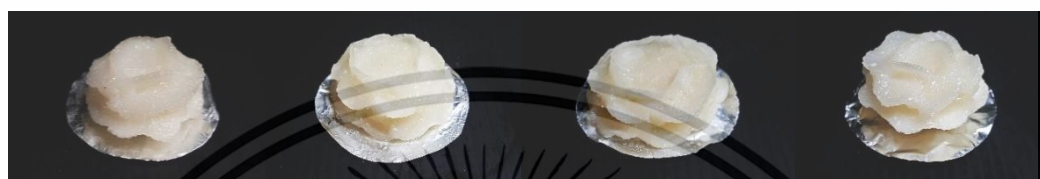
100:0

60:40

50:50

40:60

ภาพที่ 4.1 โดก่อนึ่งขนมขอม่วงที่ทดแทนแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนของแป้งข้าวปกติต่อแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนที่ต่างกัน



100:0

60:40

50:50

40:60

ภาพที่ 4.2 โดหลังึ่งขนมขอม่วงที่ทดแทนแป้งหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนของแป้งข้าวปกติต่อแป้งข้าวหอมมะลิลดค่าดัชนีน้ำตาลในอัตราส่วนที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส โดก่อนึ่งของขนมขอม่วงที่ทดแทนด้วยฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรจะมีค่าความแข็งของโดเพิ่มขึ้นแต่ค่าแรงในการเกาะพื้นผิวลดลง โดยโดที่ได้จะมีความละเอียด เหนียวติดมือ และติดเหน็บทองเหลือง ในด้านความยืดหยุ่นของโดที่มีการทดแทนฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปร มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปร ซึ่งเห็นได้จากการขึ้นรูปและทำกลีบของขนมขอม่วง โดยโดที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วนที่น้อยมีการหดตัวกลับได้มากกว่าจึงทำให้เห็นรอยกลีบที่ตื้นไม่ชัดเจนแต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเพิ่มปริมาณฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรทำให้กลีบของขนมขอม่วงมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของขนมขอม่วง สังเกตได้จากภาพที่ 4.1 ด้านแรงในการเกาะตัวของโดที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรนั้นมีค่าลดลงทำให้กลีบของโดขนมขอม่วงขาด และแตกง่ายเมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปร

ในส่วนของคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของโดหลังึ่งในตารางที่ 4.8 พบว่าโดขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร อย่างไรก็ตามค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้กลีบของขนมขอม่วงจะอยู่ตัวมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากภาพที่ 4.2 ด้านค่าแรงในการเกาะพื้นผิวของโดขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรจะมีค่าลดลง โดยโดที่ผ่านการึ่งจะมีความละเอียดและเหนียวติดมือ ในด้านความยืดหยุ่นของโดที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรจะมี

ค่าลดลง เช่นเดียวกับค่าแรงในการเกาะตัวของโคขนมขอม่วงที่มีการทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรก็มีค่าลดลง

4.5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร

ผลการวิเคราะห์ค่าสีของโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งขนมขอม่วงที่ทดแทนด้วย ฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งที่ทดแทนด้วยฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร

อัตราส่วน ฟลาวร์ข้าวดั้งเดิม: ฟลาวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปร	ก่อนนึ่ง		หลังนึ่ง	
	ความสว่าง (L*)	ค่าสีเหลือง (b*)	ความสว่าง (L*)	ค่าสีเหลือง (b*)
100	70.90 ^{ad} ± 0.29	1.58 ^a ± 0.15	69.30 ^d ± 0.43	1.42 ^b ± 0.01
60:40	71.54 ^a ± 0.33	3.19 ^c ± 0.28	69.49 ^a ± 0.43	3.42 ^b ± 0.07
50:50	71.48 ^a ± 0.74	4.26 ^b ± 0.08	69.16 ^a ± 0.17	3.58 ^b ± 0.10
40:60	70.14 ^b ± 0.30	5.33 ^a ± 0.14	68.01 ^b ± 0.54	4.11 ^a ± 0.16

หมายเหตุ: ^{ad} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสีของโคก่อนนึ่ง และหลังนึ่งของขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มลดลง และความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณฟลาวร์ผ่านการคัดแปร ทั้งในโคก่อนนึ่งและหลังนึ่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5.3 ผลการศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร

จากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วงทั้งสูตรที่ไม่ได้ทดแทนด้วยฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร และสูตรที่ทดแทนฟลาวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในระดับต่าง ๆ โดยใช้การประเมินแบบ 5 – point hedonic scale และแบบทดสอบความพอดี (Just About Right, JAR) ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.10 - 4.11

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร โดยการประเมินแบบ 5 – point hedonic scale (N=30)

คุณลักษณะ	อัตราส่วนฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม:ฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร			
	100:0	60:40	50:50	40:60
ความหนาของแป้ง ^{ns}	3.00 ± 0.64	3.20 ± 0.40	3.16 ± 0.74	3.30 ± 0.49
ความชื้นของกลีบ	2.13 ^c ± 0.93	2.96 ^c ± 0.61	3.88 ^b ± 0.37	4.46 ^a ± 0.77
สี	3.56 ^a ± 0.81	3.36 ^a ± 0.49	2.80 ^c ± 0.40	2.80 ^c ± 0.40
รสชาติของแป้ง	3.56 ^a ± 0.71	3.63 ^b ± 0.49	3.46 ^b ± 0.77	3.46 ^b ± 0.77
กลิ่นรสของแป้ง	4.10 ^{ba} ± 0.64	4.30 ^a ± 0.79	3.83 ^{cb} ± 0.37	3.56 ^c ± 0.72
การกัดขาดของแป้ง	4.50 ^a ± 0.50	4.03 ^b ± 0.61	3.40 ^c ± 0.77	3.23 ^c ± 0.89
ความนุ่มของแป้ง	4.50 ^a ± 0.50	4.20 ^a ± 0.40	3.20 ^b ± 1.17	2.83 ^c ± 1.08
ความเหนียว	4.20 ^a ± 0.40	4.10 ^a ± 0.30	3.63 ^b ± 1.40	3.16 ^b ± 1.31
ความชอบโดยรวม	4.36 ^a ± 0.49	4.23 ^a ± 0.72	3.66 ^b ± 0.75	3.56 ^b ± 0.72

หมายเหตุ: ^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิทั้งสูตรที่ไม่ได้ทดแทนด้วยฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร และสูตรที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปรในระดับต่าง ๆ โดยการประเมินแบบ 5 – point hedonic scale โดยใช้ผู้ทดสอบ 30 คนพบว่า ความชอบในด้านความหนาของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวทั้งที่ไม่ได้ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร และที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ความชอบในด้านความชื้นของกลีบ มีค่าคะแนนความชอบเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรจะทำให้กลีบของขนมขบเคี้ยวมีลักษณะที่ชื้นมากขึ้น และคงตัวมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสในด้านความแข็งที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรดังแสดงในตารางที่ 4.8 ความชอบในด้านสี รสชาติของแป้ง กลิ่นรสของแป้ง การกัดขาดของแป้ง ความนุ่มของแป้ง ความเหนียว และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร มีค่าคะแนนความชอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร โดยอัตราส่วนในการแปรรูปขนมขบเคี้ยว

ลดค่าดัชนีน้ำตาลที่ผู้ทดสอบยอมรับอยู่ในระดับคะแนน 4.23 ซึ่งอยู่ในระดับความชอบมาก คือ อัตราส่วนฟลาวัวร์ข้าวคั่วดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปรที่ 60:40

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบคุณภาพประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของขนมขอม่วงที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้การทดสอบความพอดี (Just about right, JAR) (N=30)

อัตราส่วนฟลาวัวร์ข้าวคั่วดั้งเดิม:ฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปร	คุณลักษณะ	จำนวนคนที่เลือก(ร้อยละ)		
		น้อยไป	พอดี	มากไป
100:0	ความหนาของแป้ง	0	100	0
	การกัดขาดของแป้ง	0	86.7	13.3
	ความนุ่มของแป้ง	0	86.7	13.3
	ความเหนียวของแป้ง	10	83.3	6.6
60:40	ความหนาของแป้ง	0	100	0
	การกัดขาดของแป้ง	16.6	86.6	0
	ความนุ่มของแป้ง	20	80	0
	ความเหนียวของแป้ง	23.7	76.6	0
50:50	ความหนาของแป้ง	0	100	0
	การกัดขาดของแป้ง	80	20	0
	ความนุ่มของแป้ง	80	20	0
	ความเหนียวของแป้ง	90	10	0
60:40	ความหนาของแป้ง	0	100	0
	การกัดขาดของแป้ง	96.7	3.3	0
	ความนุ่มของแป้ง	100	0	0
	ความเหนียวของแป้ง	100	0	0

จากตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบคุณภาพประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วงทั้งสูตรที่ไม่ได้ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปร และสูตรที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปรในระดับต่าง ๆ โดยใช้การทดสอบความพอดี (Just about right, JAR) พบว่าความพอดีในด้านความหนาของผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วงที่มีการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปรมีความพอดีสำหรับผู้ทดสอบในทุกอัตราส่วน ในด้านการกัดขาดของแป้ง ความนุ่มของแป้ง และความเหนียวของแป้ง ผลิตภัณฑ์ขนมขอม่วงที่มีการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการตัดแปรในอัตราส่วน 50:50 และ 40:60 ผู้ทดสอบประเมินว่าผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนมขม่อม่วงในอัตราส่วนนี้กัลดง่ายจนเกินไป และมีความนุ่ม ความเหนียวที่น้อยเกินไป สัมพันธ์กับค่าการเกาะตัวและค่าความยืดหยุ่นที่ลดลงเมื่อมีการเมื่อเพิ่มปริมาณฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งไม่พอดีสำหรับผู้ทดสอบ ส่วนผลิตภัณฑ์ขนมขม่อม่วงที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรที่ผู้ทดสอบให้ความพอดิมากที่สุดในการกัลด ความนุ่ม และความเหนียว คือ ผลิตภัณฑ์ขนมขม่อม่วงที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วน 60:40 ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบด้านความชอบโดยรวม ที่ผู้ทดสอบให้ผลิตภัณฑ์ขนมขม่อม่วงที่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรมีคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.10

4.5.4 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขม่อม่วงในสูตรทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร

เพื่อเปรียบเทียบว่าการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรลงไปในสูตรสามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขม่อม่วงได้จริง จึงมีการนำขนมขม่อม่วงที่ไม่มีการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร และสูตรที่มีการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วนที่ผู้ทดสอบให้การยอมรับมาวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาล ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลของขม่อม่วงที่ทดแทนและไม่ทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร

อัตราส่วน	ความชื้น (ร้อยละ) ^{ns}	ค่าดัชนีน้ำตาล (GI)	ร้อยละค่าดัชนีน้ำตาลที่ลดลง
100:0	68.67±2.53	81.83 ^a ±0.26	8.96
60:40	68.99±1.68	74.49 ^b ±0.23	

หมายเหตุ: ^{a,b} อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขม่อม่วงที่ไม่ทดแทนและทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปรในอัตราส่วน 60:40 (ฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม:ฟลาวัวร์ที่ผ่านการคัดแปร) พบว่าค่าดัชนีน้ำตาลของขนมขม่อม่วงที่มีการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวหอมมะลิที่ผ่านการคัดแปร มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับขนมขม่อม่วงที่ไม่มีการทดแทนฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการคัดแปร ($p < 0.05$) ซึ่งการลดลงของค่าดัชนีน้ำตาลคิดเป็นร้อยละ 8.96 การลดลงของค่าดัชนีน้ำตาลนี้เนื่องมาจากฟลาวัวร์ข้าวที่ใช้ทดแทนผ่านการคัดแปร โดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนน้อยในฟลาวัวร์ได้ ซึ่งปริมาณสตาร์ชทนน้อยจะแปรผกผันกับค่าดัชนีน้ำตาล ในงานวิจัยของ ศันสนีย์ และคณะ (2558) พบว่าเมื่อแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านกระบวนการคัดแปรวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น ที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในระดับความชื้นที่ 30

องศาเซลเซียส และผ่านกระบวนการให้ความร้อนอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส มาใช้ในผลิตภัณฑ์เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนมจีนจะทำให้มีผลต่อปริมาณแป้งทนย่อยที่เพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 5.92 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ รัชณูสินี (2557) ที่ศึกษาการลดค่าดัชนีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ขนมไทย โดยการเพิ่มปริมาณแป้งที่มี คุณสมบัติทนย่อยลงในผลิตภัณฑ์ที่ระดับร้อยละ 15 20 และ 30 ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมคอกจอกและ ขนมแข่ง ที่มีค่าดัชนีน้ำตาลจากระดับสูง (มากกว่า 70) ลดลงมาอยู่ที่ระดับกลาง (59-56)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ปริมาณอะมิโลสมีผลต่อค่าการย่อย และค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาวัวร์ข้าว โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) สูง ในขณะที่ปริมาณสตาร์ชย่อยเร็ว (RDS) จะมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ปริมาณสตาร์ชทนย่อยที่มากขึ้นนี้จะส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลลดลง

5.1.2 การตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (HMT) สามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) และลดค่าดัชนีน้ำตาล (GI) เมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม โดยการปรับให้ความชื้นเริ่มต้นของฟลาวัวร์ข้าวให้มีปริมาณร้อยละ 30 จะส่งผลให้ปริมาณสตาร์ชทนย่อยมีค่ามากที่สุด

5.1.3 การตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีแอนนิลลิง (ANN) สามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) และลดค่าดัชนีน้ำตาล (GI) เมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิม อย่างไรก็ตามการตัดแปรด้วยวิธีนี้จะส่งผลให้ฟลาวัวร์ข้าวชนิดต่าง ๆ มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงถึงระดับปานกลางเท่านั้น ดังนั้นวิธีการตัดแปรที่เลือกใช้ในการลดค่าดัชนีน้ำตาลของฟลาวัวร์ข้าวคือ วิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (HMT)

5.1.4 การตัดแปรฟลาวัวร์ข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น (HMT) จะส่งผลให้โครงสร้างสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปรมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิ่งในเซชันเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์ข้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปร นอกจากนี้ค่าความหนืดสูงสุด (PV) และค่าการแตกสลายของเม็ดแป้ง (BD) ของฟลาวัวร์ข้าวที่ผ่านการตัดแปรมีค่าลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงการที่โครงสร้างภายในเม็ดแป้งจับกันอย่างแข็งแรง และทนต่อแรงกวน ซึ่งโครงสร้างที่แข็งแรงนี้ส่งผลให้ฟลาวัวร์ข้าวมีปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) เพิ่มขึ้น และสอดคล้องไปถึงค่าดัชนีน้ำตาล (GI) ที่ลดลง

5.1.5 อัตราส่วนที่เหมาะสมของฟลาวัวร์ข้าวดั้งเดิมต่อฟลาวัวร์ข้าวตัดแปรในการทำขนมขอม่วงที่มีค่าดัชนีน้ำตาลลดลงคือ 60:40 ซึ่งเป็นสูตรที่ผู้บริโภคชอบรับประทานมากที่สุด และสามารถลดค่าดัชนีน้ำตาลลงร้อยละ 8.96 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมขอม่วงสูตรปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในงานวิจัยต่อไปควรมีการตัดแปรสตาร์ชข้าวโดยใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อให้รู้ถึงผลของวิธีการตัดแปรที่มีต่อสายสตาร์ชเท่านั้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของฟลาวรรักษาที่ได้จากการตัดแปรด้วย วิธีการแอนติลิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

งามชื่น คงเสรี. 2530. คุณภาพข้าว. เอกสารประกอบคำบรรยาย: การสัมมนาเทคโนโลยีเพื่อการส่งออกสินค้าเกษตรและปศุสัตว์. กรุงเทพฯ: กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์.

ชลดา เรืองรักษ์ลิขิต. 2552. ภาพยนตร์เครื่องควาหวาน ภาพยนตร์ราศแรมรสร้าง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ

ธัญสินี โพธิ์ภิรมณ์. 2557. การลดค่าดัชนีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ขนมไทย. วิทยานิพนธ์. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. พิษณุโลก.

นิรนาม. ขนมห่อม่วง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : sites.google.com/site/kanomchomoung.

คันสนีย์ อุดมระติ ประจเวท สาตมาลี และ วิภา สุโรจนะเมธากุล. 2558. การใช้แป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการหมักทางธรรมชาติ ร่วมกับการให้ความร้อนและความชื้น เพื่อเพิ่มสตาซ์ทนต์ต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในขงจีน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 23. ฉบับที่ 3. หน้า 509-516.

สุภาวดี แซ่ม. 2556. การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้นและการประยุกต์ใช้อาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2556. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Association of Cereal Chemists (AACC). (2000). Approved methods of analysis (11th ed.). St. Paul, MN: The Association. Approved method 32-40.01.

Baghurst, P. A., Baghurst, K., and Record, S. 1996. Dietary fibre, non-starch polysaccharides and resistant starch: a review.

Bemiller, J. N. 1997. Starch modification: challenges and prospects. *Starch-Stärke*. 49(4): 127-131.

BeMiller, J. N. 2018. *Carbohydrate chemistry for food scientists*: Elsevier.

Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., and Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 23(2): 85-112.

Champ, M., Langkilde, A.-M., Brouns, F., Kettlitz, B., and Le Bail-Collet, Y. 2003. Advances in dietary fibre characterisation. 2. Consumption, chemistry, physiology and measurement of resistant starch; implications for health and food labelling. *Nutrition Research Reviews*. 16(2): 143-161.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Collado, L. S., and Corke, H. 1999. Heat-moisture treatment effects on sweetpotato starches differing in amylose content. **Food Chemistry**. 65(3): 339-346.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., and Cummings, J. H. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**. 46: 33-50.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., Hudson, G. J., and Cummings, J. H. 2007. Measurement of resistant starch in vitro and in vivo. **British Journal of Nutrition**. 75(05): 749.
- Frei, M., Siddhuraju, P., and Becker, K. 2003. Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. **Food Chemistry**. 83(3): 395-402.
- Frost, G., Leeds, A., Dore, C., Madeiros, S., Brading, S., and Dornhorst, A. 1999. Glycaemic index as a determinant of serum HDL-cholesterol concentration. **The Lancet**. 353(9158): 1045-1048.
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A., and Saura-Calixto, F. 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. **Nutrition Research**. 17(3): 427-437.
- Gunaratne, A., and Hoover, R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. **Carbohydrate Polymers**. 49(4): 425-437.
- Higley, J., Love, S., Price, W., Nelson, J., and Huber, K. 2003. The Rapid Visco Analyzer (RVA) as a tool for differentiating potato cultivars on the basis of flour pasting properties. **American journal of potato research**. 80(3): 195.
- Hizukuri, S. 1985. Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granules. **Carbohydrate Research**. 141(2): 295-306.
- Hoover, R., and Zhou, Y. 2003. In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes—a review. **Carbohydrate Polymers**. 54(4): 401-417.
- Hormdok, R., and Noomhorm, A. 2007. Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. **LWT - Food Science and Technology**. 40(10): 1723-1731.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., and Wu, D. 2004. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. **Journal of Cereal Science**. 40(3): 231-237.

- Jacobs, H., and Delcour, J. A. 1998. Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: A review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 46(8): 2895-2905.
- Jacobs, H., Eerlingen, R., Clauwaert, W., and Delcour, J. 1995. Influence of annealing on the pasting properties of starches from varying botanical sources. **Cereal chemistry (USA)**.
- Jenkins, D., Wolever, T., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., . . . Goff, D. V. 1981. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. **The American journal of clinical nutrition**. 34(3): 362-366.
- Juliano, B. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. **Cereal Sci. Today**. 16: 334-360.
- Juliano, B. O. 1993. **Rice in human nutrition**: Int. Rice Res. Inst.
- Khunae, P., Tran, T., and Sirivongpaisal, P. 2007. Effect of heat-moisture treatment on structural and thermal properties of rice starches differing in amylose content. **Starch-Stärke**. 59(12): 593-599.
- Leach, H. W. 1959. Structure of starch granules. I. Swelling and solubility patterns of various starches. **Cereal Chem**. 36: 534-544.
- Li, S., Ward, R., and Gao, Q. 2011. Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch. **Food Hydrocolloids**. 25(7): 1702-1709.
- Lim, S.-T., Chang, E.-H., and Chung, H.-J. 2001. Thermal transition characteristics of heat-moisture treated corn and potato starches. **Carbohydrate Polymers**. 46(2): 107-115.
- Lunn, J., and Buttriss, J. 2007. Carbohydrates and dietary fibre. **Nutrition Bulletin**. 32(1): 21-64.
- Miao, M., Jiang, B., Cui, S., Zhang, T., and Jin, Z. 2013. **Slowly Digestible Starch—A Review** (Vol. 55).
- Miller, J. B., Pang, E., and Bramall, L. 1992. Rice: a high or low glycemic index food? **The American journal of clinical nutrition**. 56(6): 1034-1036.
- Nugent, A. P. 2005. Health properties of resistant starch. **Nutrition Bulletin**. 30(1): 27-54.
- Olayinka, O. O., Adebawale, K. O., and Olu-Owolabi, B. I. 2008. Effect of heat-moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch. **Food Hydrocolloids**. 22(2): 225-230.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. 2006. Resistant Starch—A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 5(1): 1-17.

- Schirmer, M., Jekle, M., and Becker, T. 2015. Starch gelatinization and its complexity for analysis. **Starch - Stärke**. 67(1-2): 30-41.
- Stute, R. 1992. Hydrothermal modification of starches: The difference between annealing and heat/moisture-treatment. **Starch-Stärke**. 44(6): 205-214.
- Tester, R. F., Karkalas, J., and Qi, X. 2004. Starch—composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**. 39(2): 151-165.
- Van Hung, P., Chau, H. T., and Phi, N. T. L. 2016. In vitro digestibility and in vivo glucose response of native and physically modified rice starches varying amylose contents. **Food Chemistry**. 191: 74-80.
- Whistler, R. L., and Daniel, J. R. 1984. Molecular structure of starch **Starch: chemistry and technology** (pp. 153-182): Elsevier.
- Zavareze, E. d. R., Storck, C. R., de Castro, L. A. S., Schirmer, M. A., and Dias, A. R. G. 2010. Effect of heat-moisture treatment on rice starch of varying amylose content. **Food Chemistry**. 121(2): 358-365.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ผลงานเรื่อง การศึกษาสมบัติการย่อยในหลอดทดลองของฟลาวอร์ข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ตัดแปรด้วย
วิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น และวิธีแอนนิลลิ่ง ในการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษา
ระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 6 จัดขึ้นที่มหาวิทยาลัยศิลปากร ในวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ.2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ผลงานเรื่อง Physicochemical properties of Thai low glycemic index (GI) rices differing in amylose content. ถูกนำเสนอในงานประชุมวิชาการ “International Symposium on Biocontrol and Biotechnology (ISBB 2017)” ที่เมือง Hurghada ประเทศ Egypt ระหว่างวันที่ 17-20 ตุลาคม พ.ศ. 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ทางเคมี

การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (Juliano, 1971)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานอะมิโลส

1. ชั่งอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.040 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ ระวังอย่างให้อะมิโลสเกาะที่ผนังขวด
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
4. กวนของเหลวในขวดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า นาน 10 นาที
5. นำแท่งแม่เหล็กออก และล้างส่วนที่ติดกับแท่งแม่เหล็กกลับมาลงในขวดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

การเตรียมตัวอย่าง

1. บดเมล็ดข้าวด้วยเครื่องบดแห้ง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรง
2. ชั่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เติมสารตามขั้นตอนการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะมิโลสในข้อที่ 2 – 5

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ปิเปตสารละลายจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร
3. ปิเปตสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
4. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
6. ทำ blank เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง
7. วิเคราะห์ความเข้มสีของสารละลายโดยใช้เครื่อง spectrophotometer วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลาย blank เท่ากับศูนย์
8. นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปหาปริมาณอะมิโลส โดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายจากการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะมิโลสปริมาตร 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปิเปตสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีสารละลายมาตรฐาน ตามลำดับ
4. ปิเปตสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร และเขียนกราฟระหว่างปริมาณอะมิโดส (คิดเป็นร้อยละ 8 16 24 32 และ 40) กับค่าการดูดกลืนแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางนภัสรพี เหลืองสกุล
 ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 7
 หน่วยงานที่อยู่ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 โทรศัพท์ 0 2329-8526-7 โทรสาร 0 2329-8526-7
 E-mail: klarunee@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.ด	เทคโนโลยีทางอาหาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2553
วท.ม	เทคโนโลยีทางอาหาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2544
วท.บ.	เทคโนโลยีทางอาหาร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2535

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ : Rice products, Bread technology, Bakery technology, Cereal-based products and Fermented-cereal based products, Starch technology

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

BOOK CHAPTER:

Keeratipibul S, Luangsakul N (2012): Chinese steamed buns. In Handbook of Plant-Based Fermented Food and Beverage Technology, 2ed, edited by Y. H. Hui; E. Özgül Evranuz, CRC presss, NY.

PUBLICATIONS IN ARTICLES:

Luangsakul, N. 2003. Varietal Differences of Thai Glutinous Rice in relation to Quality Characteristics of Traditional Thai Rice Cracker (Khao-tan). **King Mongkut's Agricultural Journal**. 21(3), pp 55-67. (in Thai)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Luangsakul, N., Kulmanoachwong, D., Chivavithunekit, P. 2004. Utilization of Skipjack Fish Bone in Traditional Thai Rice Cracker (Khao-tan) for Calcium Fortification. King Mongkut's Agricultural Journal. 22(1), pp 61-69. (in Thai)**
- Keeratipibul, S., **Luangsakul, N., Lertsatchayarn, T. 2008. The effect of Thai glutinous rice cultivars, grain length and cultivating locations on the quality of rice cracker (arare). LWT-Food Science and Technology, 41, 1934-1943.**
- Luangsakul, N, Keeratipibul, S, Jindamorakot, S., Tanasupawat, S. 2009. Lactic acid bacteria and yeasts isolated from the starter doughs for Chinese steamed buns in Thailand. LWT-Food Science and Technology, 42, 1404-1412.**
- Keeratipibul, S., **Luangsakul, N., Otsuka, S., Sakai, S., Hatano, Y., Tanasupawat, S. 2010. Application of the Chinese steamed bun starter dough (CSB-SD) in breadmaking. Journal of Food Science, 75, 596-604.**
- Keeratipibul, S., **Luangsakul, N., Otsuka, S., Sakai, S., Hatano, Y., Tanasupawat, S. 2012. Effects of the amount of Chinese steamed bun starter dough (CSB-SD) and the activation time on dough and bread properties. Journal of Food Processing and Preservation, properties, 37, 232-244.**
- Luangsakul, N., Supasom, B. and Yaiyen, S. 2016. Impact of the Enzymatic Modification of Rice Flours on *In Vitro* Digestibility and Molecular Properties. Journal of Agricultural Technology. 12(7.2): 2141-2154.**
- Wongsrisiri, S and **Luangsakul' N. 2017. Effect of setting agent on quality of tubed-package on sesame tofu. Journal of Agricultural Technology. 13(7.1): 1517-1526.**
- Ritudomphol, O and **Luangsakul, N. 2018. Optimization of Processing Condition of Instant Rice to Lower the Glycemic Index. Journal of Food Science. DOI: 10.1111/1750-3841.14406. (SJR 2017: Q1)**

การเสนอผลงานวิชาการ

CONFERENCE FULL TEXT

- Chupanit, W., Mulser, C. and **Luangsakul, N. 2003. Utilization of Red Snapper Fish Bone In Butter Cookies for Calcium Fortification. In Proceedings of the 5th Agro-Industrial Conference THAIFEX AND THAIMEX 2003. Bitec Convention Center, Bangkok. 30th-31st May, 2003: pp: 282-288. (in Thai)**

- Luangsakul, N. 2004. Effect of Processing Parameters in relation to Qualities of Traditional Thai Fried Rice Cracker (Khao-Tan).** In Proceedings of the 1st KMITL International Conference on Integration of Science and Technology for Sustainable Development. KMITL, Bangkok, Thailand. 24th-26th August, 2004: pp: 379-384.
- Luangsakul, N., Katekasem, P., Suksawang, M. and Pornanansiri, S. 2011 The effects of the amount and type of wheat flour and mixing method on the quality of fortune cookies.** In Proceedings of the 49th Kasetsart University Annual Conference. Kasetsart University, Bangkok, Thailand. 1st-4th February, 2011: pp: 290-298. (in Thai)
- Luangsakul, N., Siamtong, A., Wongthida, T., and Punga, U. 2011. Effects of dough sheeting, dough weight and proofing temperature on dough and bread properties using no-time dough method.** In Proceedings of The 12th Asean Food Conference 2011. BITEC Bangna, Bangkok, Thailand 16th-18th June, 2011: pp: 556-559.
- Lunnawa, P., Luangsakul, N. 2012. Composition and physicochemical properties of starch isolated from Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis* Trin.).** In Proceedings of the 1st Asean plus three Graduate Research Congress (AGRC 2012). Chiang Mai, Thailand, 1st - 2nd March, 2012. pp: 422-428.
- Luangsakul, N., Ruenpirom, S., Boothsri, A. 2012. Pasting properties of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis* Trin.) starch and textural properties of its gel.** In Proceedings of the 14th Food Innovation Asia Conference 2012. BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 14th-15th June, 2012. pp: 37-42.
- Luangskul, N., Apiwong, P., Reungsang, M. and Kaewmon, A. 2012 Development of freeze-dried snack from Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis* Trin.).** In Proceedings of the 14th Food Innovation Asia Conference 2012. BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 14th-15th June, 2012: pp: 318-324.
- Jaikwang, K. and Luangsakul, N., 2012. Characteristics of dough and Chinese steamed bun fermented from Thai traditional fermentation starter (Loog-Pang) produce in the northern part of Thailand.** In Proceedings: The 1st KMITL Agro-Industry Conference. The Emeral Hotel, Bangkok, Thailand, 7st September, 2012 pp: 109-116. (in Thai)
- Suksawat, C. and Luangsakul, N. 2012. Resistant starch content and physicochemical properties of legume flour.** In Proceedings: The 1st KMITL Agro-Industry Conference. The Emeral Hotel, Bangkok, Thailand, 7st September, 2012 pp:214-220. (in Thai)

- Rongchoung, J. and **Luangsakul, N.** 2012. **Effects of selected gluten-free flours on the qualities of gluten-free cookies.** In Proceedings: The 1st KMITL Agro-Industry Conference. The Emeral Hotel, Bangkok. Thailand, 7st September, 2012. (in Thai)
- Oamsukho, N. and **Luangsakul, N.** 2013. **Effects of various processing techniques on the in vitro starch digestibility in Pigeon Pea, Red kidney bean and Chinese water chestnut starch.** In Proceedings: The 2nd KMITL Agro-Industry Conference. The Windsor Hotel, Bangkok. Thailand, 30st August, 2013 pp: 145-151.
- Sartsara, W., and **Luangsakul, N.** 2014. Characteristics of the bread made from rice and legume flours substituted to wheat flour. In Proceedings of the **International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014)**. Ayodya resort, Bali, Indonesia, 27th-29th June, 2014. pp: 602-611.
- Supasom, B., and **Luangsakul, N.** 2014. Comparison of *in vitro* starch digestibility between legumes, tubers and cereals. In Proceedings of the **International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014)**. Ayodya resort, Bali, Indonesia, 27th-29th June, 2014. pp: 612-622.
- Chomchuenjitsin, T., and **Luangsakul, N.**, 2014. Effects of oil types on the quality of cake for vegans. In Proceedings of the **International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014)**. Ayodya resort, Bali, Indonesia, 27th-29th June, 2014. pp: 623-630.
- Luangsakul, N.** and Sillar, P. 2017. Physicochemical properties of Thai low glycemic index (GI) rices differing in amylose content. In the Proceesing of the 15th International Symposiumon Biocontrol and Biotechnology (ISBB 2017), Hurghada, Egypt, 17-20th October, 2017. pp: 130-137.
- ภัทรารักษ์ ศิลลาและ นภัสรพี เหลืองสกุล. 2559. การศึกษาสมบัติการย่อยในหลอดทดลองของพลาวยาวชนิดต่าง ๆ ที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนร่วมกับความชื้น และวิธีแอนนิลลิ่ง. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 6. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 12 กรกฎาคม: 253-254.
- Chiralaksanakul, N. and **Luangsakul, N.** 2018. **Effects of aging egg white on quality of macaron shell.** In Proceeding of the 20th Food Innovation Asia Conference 2018, BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 14-16th June, 2018. pp: 23-27.

รางวัลด้านวิชาการ

Young Investigator's Award, the excellent paper of Characteristics of two cultivars of Thai glutinous rice and their application to the rice crackers (arare) in the 2nd International Symposium on Rice and Disease Prevention, 26th-27th October, 2008. Wakayama, Japan



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้