

รหัสโครงการ SUT3-305-51-24-07



รายงานการวิจัย

การพัฒนาข้าวขึ้นรูปกึ่งสำเร็จรูปเพื่ออาหารสุขภาพ (Development of Instant Reformed Rice for Functional Food)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาข้าวขึ้นรูปกึ่งสำเร็จรูปเพื่ออาหารสุขภาพ (Development of Instant Reformed Rice for Functional Food)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2551

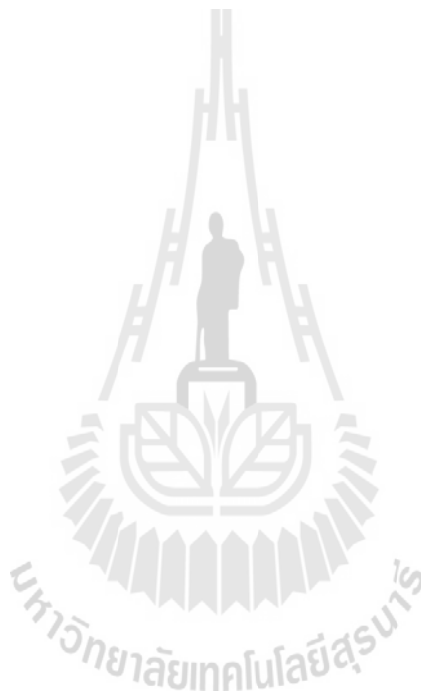
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2552 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับอาคาร สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาดผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวสุนทรี เจริญพร จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย



บทคัดย่อ

การศึกษาการแปรรูปข้าวขึ้นรูปจากแป้งข้าวพันธุชยันนาท (อะมิโลส 32.9%) ด้วยเครื่องเอกซ์ทราเตอร์แบบสกรูคู่หมุนตามกัน ใช้หน้าแปลนรูปเมล็ดข้าว โดยใช้ความชื้นของการเอกซ์ทราชัน (em) 28 และ 33% อุณหภูมิบารเล 90 และ 110°C อัตราการป้อนวัตถุดิบ 0.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาที ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีระยะเวลาการหุงต้มน้อยลง 4 – 8 นาที ใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้น 13 - 29% มีความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะมากกว่าข้าวสารปกติ มีระดับการสลายตัวในสารละลายเบสสูงที่สุดที่ระดับ 7 และสูงกว่าข้าวสารปกติที่ระดับ 6 เมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพบว่าข้าวขึ้นรูปสูญเสียโครงสร้างที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมของเม็ดแป้ง ภาพตัดขวางของข้าวขึ้นรูปมีลักษณะเป็นมวลเนื้อเดียวกันแน่นแป้งข้าวขึ้นรูปมีระดับการเกิดเจลลาติโนเซชัน 22 – 49% ดัชนีการอุ้มน้ำ 1.53 – 15.58 g/g และดัชนีการละลายน้ำ 2.73 – 4.21% สูงกว่าแป้งข้าวพันธุชยันนาท เมื่อความชื้นของการเอกซ์ทราชันและอุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้น ระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มความชื้นของการเอกซ์ทราชันทำให้ดัชนีการอุ้มน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ ระยะเวลาการหุงต้มปริมาณน้ำในการหุงต้ม ความเหนียว และแรงกดอัดภายในภาชนะมีค่ามากขึ้น การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (WAXS) พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะ em28% + 90°C, em 28% + 110°C และ em33% + 90°C แสดงลักษณะผลึกแบบ A + V ปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะ em33% + 110°C มีโครงสร้างผลึกแบบ V เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนด้วย Differential Scanning Colorimeter พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (onset temperature, To), อุณหภูมิสูงสุดของการหลอม (peak temperature, Tp), อุณหภูมิสุดท้ายของการหลอม (conclusion temperature, Tc) สูงกว่าแป้งข้าวพันธุชยันนาท แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะ em33% + 110°C มีค่า To, Tc และ Tp สูงที่สุด คือ 104, 109 และ 117°C ตามลำดับ

คำสำคัญ : ข้าวขึ้นรูป เอกซ์ทราชัน คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

Abstract

Chainat rice flour (amylose 32.9%) was extruded as reformed rice grains using a co-rotating twin screw extruder with a rice-shaped die. The extrusion moistures (em) were studied at 28% and 33% and the barrel temperatures were varied at 90°C and 110°C. The feed rate and screw speed were set at 0.5 kg/hr and 30 rpm respectively. Reformed rice showed a lower cooking time of 4-8 minutes, but a higher water intake of 13-29%. Its stickiness and back extrusion force were higher than those of native rice. Reformed rice had the highest alkali spreading value of 7, which was higher than that of native rice grain with the value of 6. Images from the scanning electron microscope revealed that the structure of reformed rice did not show a polygonal granular structure. The images of a cross-section of reformed rice showed a compact homogeneous mass. The reformed rice flour exhibited a higher degree of gelatinization (DG, 22 – 49%), water absorption index (WAI, 1.53 – 15.58 g/g) and water solubility index (WSI, 2.73 – 4.21%) than those of native rice flour. The DG was increased when the extrusion moisture and the barrel temperature were higher. An increase in extrusion moisture raised WAI, WSI, minimum cooking time, percentage water intake, and the stickiness and back extrusion force of reformed rice. Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) demonstrated that the reformed rice flour using conditions of extrusion at em 28% + 90°C, em28% + 110°C and em33% + 90°C showed an A + V-type pattern crystalline structure but that of em33% + 110°C had a V-type structure. The thermal properties were studied by using a Differential Scanning Colorimeter. The reformed rice flours showed a higher onset temperature (To), peak temperature (Tp) and conclusion temperature (Tc) than those of native rice flour. The To, Tp and Tc of reformed rice flour at em33% + 110°C were the highest, being 104, 109 and 117°C, respectively.

Keywords : Reformed rice, Extrusion, Physical properties, Physicochemical peoperties

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว.....	4
2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	4
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว.....	5
2.2 คุณสมบัติของข้าวและแป้งข้าว.....	9
2.2.1 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก.....	9
2.2.2 สมบัติการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน.....	10
2.3 การแปรรูปอาหาร โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	12
2.3.1 หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์.....	12
2.3.2 ประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอกซ์ทรูด.....	13
2.3.3 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	ข้าวหุงสุกเร็ว	15
3	วิธีดำเนินการวิจัย	18
3.1	วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ	18
3.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	18
3.2.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว	18
3.2.2	การหาปริมาณอะมิโลส	19
3.3	การศึกษาสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	19
3.4	คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป	20
3.4.1	ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป	20
3.4.2	การทดสอบคุณภาพการหุงต้ม	21
3.4.3	การทดสอบคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส	22
3.4.4	การวิเคราะห์ความสามารถในการสลายตัวในสารละลายเบส	22
3.4.5	การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	23
3.5	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป	24
3.5.1	คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป	24
3.5.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน	25
3.6	การวิเคราะห์ทางสถิติ	26
3.7	สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล	26
4	ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	27
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของข้าว	27
4.2	การศึกษาเบื้องต้นการแปรรูปข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	27
4.2.1	คำจำกัดความของ “ข้าวขึ้นรูป”	27
4.2.2	การศึกษาเบื้องต้นการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	27
4.3	ผลของสภาวะการผลิตต่อลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป (Appearance of reformed rice)	27
4.3.2	การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องกราด	29
4.3.3	สมบัติการสลายตัวในสารละลายเบส	30
4.4	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป	34
4.4.1	ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Degree of gelatinization, DG)	34
4.4.2	ดัชนีการดูดซับน้ำและการละลาย	34
4.5	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป	37
4.5.1	คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)	37
4.5.2	คุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	38
4.6	การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวขึ้นรูป	39
4.7	การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป	41
5	สรุปผลการวิจัย	45
	รายการอ้างอิง	46
	ภาคผนวก	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงรูปแบบการจัดเรียงสกรู (จากทางป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)	20
3.2 แสดงการตั้งอุณหภูมิของบารเล	21
3.3 แสดงแผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	21
3.4 ค่าสภาวะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส	22
4.1 แสดงการตั้งอุณหภูมิของบารเล	28
4.2 แผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDML105) และ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 (SPBR 90)	28
4.3 แสดงค่าทอร์ค(%) ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	29
4.4 ความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูป	30
4.5 แสดงระดับการสลายตัวในสารละลายเบสของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท	33
4.6 แสดงระดับการเกิดเจลลาคีโนซิส (Degree of gelatinization, DG) ของแป้งข้าวขึ้นรูป	35
4.7 แสดงค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI) และค่าดัชนี การละลาย (Water Solubility Index, WSI) ของแป้งข้าวขึ้นรูป	37
4.8 แสดงระยะเวลาการหุงต้ม (นาที) ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (%) ของข้าวขึ้นรูป	38
4.9 แสดงค่าความแข็ง และความเหนียวของข้าวขึ้นรูป	40
4.10 แสดงรูปแบบผลึก (Crystal pattern) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป	40
4.11 แสดงค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ ชัยนาทด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC)	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว.....	5
2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (a) อะมิโลส (b) อะไมโลเพคติน	6
2.3 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C.....	7
2.4 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของเม็ดแป้ง.....	7
2.5 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B	10
2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A, B และ Vh.....	10
2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	11
2.8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลัง กับน้ำ (30 :70)	12
3.1 ลักษณะของเมล็ดข้าวที่ละลายในสารละลายเบส.....	23
4.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90°C (b) em 28% + 110°C (c) em 33% + 90°C (d) ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (em : extrusion moisture).....	31
4.2 แสดงตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้.....	32
4.3 โครงสร้างจุลภาคของข้าวต่างๆที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด ส่องกราด (SEM): ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90°C (b) em 28% + 110°C (c) และ em 33% + 90 °C (d).....	33
4.4 แสดงลักษณะของเมล็ดข้าวขึ้นรูปและข้าวสารพันธุ์ชัยนาทที่สลายตัว ในสารละลายเบส.....	35
4.5 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Wide Angle X-ray Scattering) (WAXS).....	41

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ข้าว เป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ที่สามารถส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก โดยการส่งออกอยู่ในรูปของข้าวเปลือกและข้าวสารเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีมูลค่าเพิ่มค่อนข้างต่ำ และมีราคาเปลี่ยนแปลงตามภาวะตลาดโลก และตามผลผลิตของประเทศคู่ค้าและคู่แข่ง ในปัจจุบันมีหลายประเทศพยายามค้นคว้าวิจัยเพื่อการเพาะปลูกและเพิ่มผลผลิตข้าวมากขึ้น เช่น เวียดนาม จีน และ อินเดีย ทำให้ตลาดการส่งออกข้าวของไทยมีภาวะการแข่งขันที่สูงขึ้น ปริมาณการส่งออกข้าวของไทยลดลง โดยเฉพาะในตลาดข้าวคุณภาพปานกลาง (ข้าวขาว 10 -20%) และตลาดข้าวคุณภาพต่ำ (ข้าว 25% จนถึงปลายข้าว) ซึ่งประเทศคู่แข่งเหล่านี้สามารถผลิตได้ในต้นทุนที่ต่ำกว่าไทย (จักรพันธ์ เกษภิญโญ, 2547) ดังเห็นได้จากในปี 2547 ประเทศไทยส่งออกข้าวได้ 10 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 108,394 ล้านบาท แต่ในปี 2548 ประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวได้ลดลงเหลือเพียง 7.54 ล้านตัน หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 93,548 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549) ในขณะที่การส่งออกผลิตภัณฑ์จากข้าวของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยควรมีการพัฒนาปรับปรุงการแปรรูปข้าวสารให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้สูงขึ้น และมีราคาที่ค่อนข้างเสถียรภาพ ไม่ขึ้นลงตามภาวะสินค้าเกษตร และเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับประเทศคู่แข่ง

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเกี่ยวกับข้าวขึ้นรูป ข้าวหุงสุกเร็ว และข้าวเสริมคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มอาหารเหล่านี้กำลังได้รับความสนใจจากประชาคมโลกอย่างสูง ดังสิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP5013874B2 ซึ่งทำการผลิตข้าวขึ้นรูปจากข้าวหักที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนเมล็ดข้าว ผลิตข้าวขึ้นรูปผสมวิตามินเพื่อแก้ปัญหาคาดสารอาหารของประชากรบางพื้นที่ ที่ทำการผลิตโดยใช้แป้งฟลาวาร์ข้าว ความชื้น 15-35 % เดิมอิมัลซิไฟเออร์ เดิมน้ำ และน้ำมัน ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่อุณหภูมิบารเรล 60-120°C โดยมีระยะเวลาที่แป้งข้าวอยู่ในบารเรลอยู่ในช่วง 1-90 วินาที Keshani (2011) ทำการผลิตข้าวขึ้นรูปเพื่อใช้ในการควบคุมความดันเลือด ชดเชยภาวะโลหิตจาง การขาดแคลเซียม และโปรตีน เพสท์ของแป้งจะถูกกดภายใต้ภาวะสูญญากาศโดยเครื่องโครโมล่า (cromola machine) โดยกดใส่โมลรูปเมล็ดข้าวเพื่อขึ้นรูป ทำการทำให้แห้ง และบรรจุลงบรรจุภัณฑ์ สิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR101171258B1 ทำการผลิตข้าวเทียมที่ให้รักษาระดับน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับต่ำ โดยแป้งข้าวขนาดอนุภาค 200-300 ไมโครเมตร ผสม

กับ Xylose crystal (บริสุทธิ์ 97%) ขนาดอนุภาค 180-200 ไมโครเมตร และผ่านกระบวนการเอกซ์ทราซัน และขึ้นรูปเม็ดข้าวโดยใช้โม่ล สิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP2012139158A ทำการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยใช้สตราซัว ผสมอัลจินิก เอซิด ทำให้เป็นเจล ทำแห้ง ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราซัน ขึ้นรูปเม็ดข้าวโดยใช้โม่ล เพื่อทำให้เป็นรูปเม็ดข้าว สิทธิบัตรจีนเลขที่ CN102599433A ผลิตข้าวขึ้นรูปเพื่อแก้ปัญหาด้านโภชนาการ โดยผลิตจากแป้งข้าว แป้งจากธัญชาติหลายชนิด เสริมด้วยวิตามิน นำโดของแป้งมาทำเป็นรูปร่างเม็ดข้าว แล้วทำการอบแห้ง สิทธิบัตรจีนเลขที่ CN102578475A ผลิตข้าวโภชนาการสูงเพื่อป้องกันการขาดสารอาหาร และป้องกันโรคต่างๆ โดยผสมข้าว ธัญพืช กับน้ำบาดแล้วร้อนด้วยตระแกรง mesh no. 80 ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราซัน ที่ความเร็วรอบสกรู 160rpm แล้วขึ้นรูปเพื่อให้เป็นรูปเม็ดข้าว จากนั้นทำการอบแห้ง สิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP2012120537A ผลิตข้าวโภชนาการสูงโดยการเติมวิตามินรวม เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนสารอาหารในประชากรแถบอเมริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกากลาง โดยกระบวนการเอกซ์ทราซัน ตัดโดของแป้งให้มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดข้าว สิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP4953452B2 ทำการผลิตข้าวเทียม โดยวัตถุดิบคือแป้งข้าวผสมแป้งถั่วเหลือง ใช้กระบวนการเอกซ์ทราซัน อุณหภูมิบารเรล 75-155°C เพื่อนวดแป้ง จากนั้นนำสู่กระบวนการเอกซ์ทราซัน อุณหภูมิบารเรล 0-95°C เพื่อผสมแป้งข้าวและแป้งถั่วเหลือง ขึ้นรูปเป็นเม็ดข้าว โดยใช้ extrusion molding หลังจากนั้นจึงทำแห้ง สิทธิบัตรจีนเลขที่ CN102396664A ทำการผลิตข้าวหุงสุกเร็วโดยใช้ใช้กรรมวิธีอัดแป้งสุกเป็น pellets สิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR1020120008735A ทำการผลิตข้าวเทียมเสริมโภชนาการ โดยการแช่ข้าวในน้ำอุณหภูมิประมาณ 5-20°C ล้าง 1-5 ครั้ง ทิ้งให้แห้ง บดแล้วร้อนด้วยตระแกรงร้อน mesh no.50 ผสมกับ medical plant ในอัตราส่วนแป้งข้าว:medical plant คือ 30:70 นึ่งส่วนผสมที่อุณหภูมิ 90-120°C ระยะเวลา 10-60 นาที ขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทราซันให้มีขนาด 0.5-10 mm ทำแห้งนาน 6-24 ชั่วโมง สิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR1020120008734A ทำการผลิตข้าวขึ้นรูป วัตถุดิบคือแป้งข้าวผสมสาหร่าย โดยกระบวนการเอกซ์ทราซัน ขึ้นรูปให้มีขนาด 0.5-10 mm สิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP2011211929A ผลิตข้าวเสริมโภชนาการ วัตถุดิบคือข้าวผสมรำข้าว พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มคุณค่าสารอาหาร เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ Yun (2009) ผลิตข้าวหุงสุกเร็วทำโดยนำข้าวไปแช่น้ำอุ่น จากนั้นอบแห้ง และทำการ Puffing สิทธิบัตรจีนเลขที่ CN1115107C ทำการผลิตข้าวโภชนาการสูงจากข้าวสาลีโดยกระบวนการเอกซ์ทราซัน โดยใช้อุณหภูมิบารเรล 125 - 135°C ขึ้นรูปให้มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดข้าว C. Wang, Shen and S. Wang (1997) ที่ทำการผลิตข้าวหุงสุกเร็วโดยกระบวนการเอกซ์ทราซัน ขึ้นรูปเม็ดข้าวโดยใช้โม่ล เพื่อทำให้เป็นรูปเม็ดข้าว และสิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR1020020026765A ผลิตข้าวขึ้นรูปโดยการนึ่งแป้งข้าวให้สุกแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราซัน

อุตสาหกรรมการแปรรูปข้าวของประเทศไทย มีจุดแข็งในด้านวัตถุดิบ ซึ่งสามารถหาได้ในประเทศ และมีศักยภาพในการผลิตวัตถุดิบสูง แต่ยังคงขาดองค์การเฉพาะทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์แปรรูปข้าวและเทคโนโลยีที่ชัดเจน ทำให้ประเทศไทยยังมีการใช้ประโยชน์จากข้าวเพื่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์น้อย และมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ไม่มากนัก (ชวาลวุฒฒ ไชยบุญวัติ, 2547) ดังนั้นจึงควรมีการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวที่สามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของตลาดได้มากขึ้น เช่น ผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วของบริษัท เอเชียน สุปิเรียฟูดส์ จำกัด เป็นการผลิตข้าวสวยและข้าวปรุงรสถึงสำเร็จรูปที่สามารถคืนรูปเป็นผลิตภัณฑ์พร้อมรับประทานได้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกรวดเร็ว และยังสามารถทดแทนการบริโภคกะหล่ำปลีสำเร็จรูปที่ต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วที่มีการผลิตนั้นส่วนใหญ่จะใช้วัตถุดิบในการแปรรูปเป็นเมล็ดข้าวสาร แต่ในกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวสารนั้น จะมีผลพลอยได้จากการแปรรูปคือ ข้าวหักและปลายข้าว ซึ่งเป็นส่วนที่มีมูลค่าต่ำ ดังนั้นถ้ามีการใช้ผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าวเหล่านี้มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวขึ้นรูปหุงสุกเร็วหรือข้าวขึ้นรูปถึงสำเร็จรูป จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้ได้มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการใช้ประโยชน์จากข้าวได้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้หากมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นให้ข้าวกลุ่มนี้เป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น และสามารถเป็นอาหารเพื่อสุขภาพได้ ซึ่งปัจจุบันเป็นกลุ่มอาหารที่กำลังได้รับความสนใจจากประชาคมโลกอย่างสูงก็จะยิ่งเพิ่มมูลค่าของข้าวหักและปลายข้าวได้มากขึ้นอีกหลายเท่า

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆของการแปรรูปที่มีต่อการผลิตข้าวขึ้นรูป
- 2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปข้าว

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

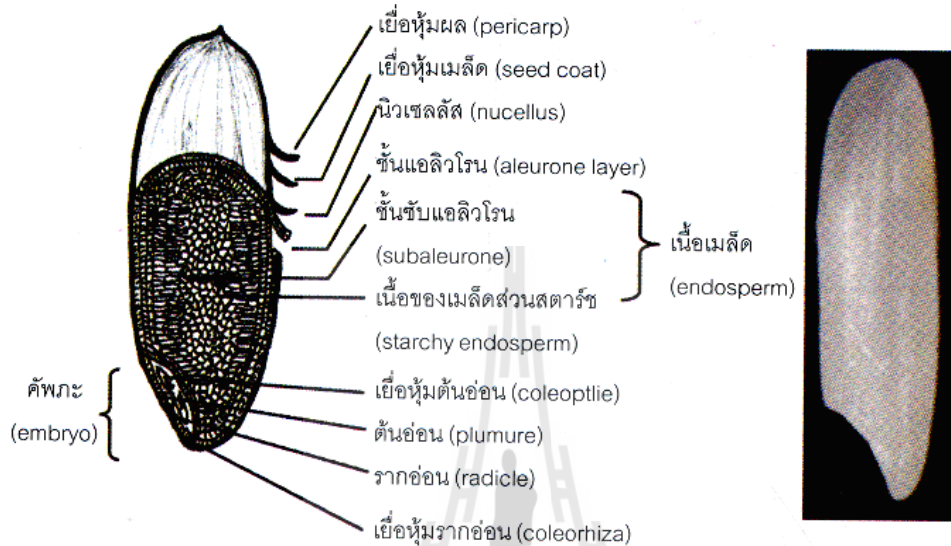
“ข้าว”จัดเป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า (Gramineae) จัดอยู่ในสกุล (genus) ออไรซ่า (Oryza) สกุลนี้ประกอบด้วยชนิด (species) ต่าง ๆ ถึง 25 ชนิดแต่ชนิดที่เพาะปลูกเป็นอาหารมีเพียง 2 ชนิด คือ ข้าวปลูกเอเชีย (*Oryza sativa* Linn.) และ ข้าวปลูกแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud.) ซึ่งข้าวที่ค้าขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดเป็นข้าวที่ปลูกจากแถบเอเชีย สามารถแบ่งได้ตามแหล่งปลูก อีกคือข้าวอินดิกา (Indica) มีลักษณะเมล็ดยาวรี ต้นสูง เป็นข้าวที่ปลูกในเอเชียเขตร้อน ตั้งแต่จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย อินเดีย และศรีลังกา ข้าวพันธุ์นี้ค้นพบครั้งแรกในอินเดียและต่อมาได้พัฒนาไปปลูกที่ทวีปอเมริกาข้าวจาпонิกา (Japonica) เป็นข้าวที่ปลูกในเขตอบอุ่น เช่น จีน ญี่ปุ่น เกาหลี มีลักษณะเมล็ดป้อมกลมรี ต้นเตี้ยข้าวจาวานิกา (Javanica) ปลูกในอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ มีเมล็ดป้อมใหญ่ แต่ไม่ได้รับความนิยมเพราะให้ผลผลิตต่ำ (ข้าว, 2547)

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารประจำวันมากกว่าในภูมิภาคอื่น ๆ สำหรับประเทศไทยแล้ว ข้าวเป็นพืชอาหารประจำชาติที่มีตำนานประวัติศาสตร์ยาวนาน ปรากฏเป็นร่องรอยพร้อมกับอารยธรรมไทยมาไม่น้อยกว่า 5,500 ปี ซึ่งมีหลักฐานจากเครื่องปั้นดินเผา ถ้ำถ่าน ในดิน และโบราณวัตถุอื่น ๆ (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2552) ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย โดยนอกจากเป็นอาหารที่มีการบริโภคเป็นหลักของคนไทยและเป็นอาชีพหลักของเกษตรกรแล้ว ไทยยังเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก โดยในปี 2554 ไทยมีส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 30 ซึ่งนำรายได้เข้าสู่ประเทศมากกว่าสองแสนล้านบาท (สมาคมโรงสีข้าวไทย, 2555)

2.1.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าว ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวหรือผล เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) และส่วนเนื้อผล หรือผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) แกลบ ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ประกบกันโดยแกลบจะถูกกำจัดออกระหว่างการสีข้าว (ชาญ มงคล, 2536) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยขน หาง (awn) ข้าวเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas) ซึ่งเชื่อมต่อกับก้าน (pedicel) ส่วนเนื้อผลหรือข้าวกล้อง (รูปที่ 2.1) มีส่วนประกอบเรียงลำดับจากชั้นนอกถึงชั้นใน ดังนี้ คือเยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) นิวเคลลัส (nucellus) เยื่อหุ้มชั้นใน (aleurone layer) เอนโดสเปิร์ม (endosperm) หรือส่วนของข้าวสาร ในส่วนนี้ประกอบด้วย เยื่อชั้นในสุด (subaleurone) และส่วนของเนื้อสตาร์ช (starchy endosperm) ซึ่งมีมากที่สุด ในเมล็ดข้าว (ประมาณ 80% ของเมล็ด)

ทั้งหมด) ซึ่งประกอบด้วยเม็ดสตาร์ชมีลักษณะห้าเหลี่ยมขนาดประมาณ 2 – 10 ไมครอนจับเป็นกลุ่ม แน่นส่วนโปรตีนมีลักษณะเป็นก้อนกลมขนาด 1 – 4 ไมครอนแทรกอยู่กับเม็ดสตาร์ชที่กระจาย ตัวอย่างอิสระโดยมีเม็ดไขมันอยู่ใกล้ ๆ แต่มีในปริมาณน้อยกว่าโปรตีน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

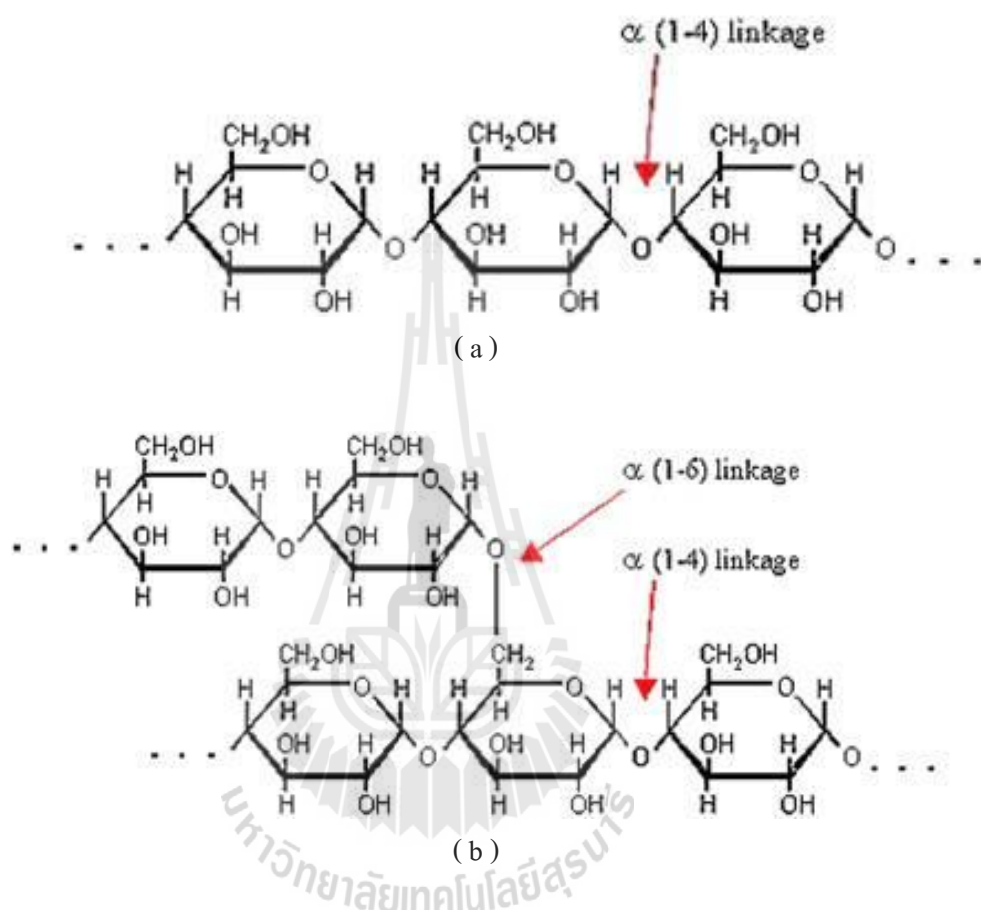
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าวคือคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และ น้ำ หรือความชื้น

2.1.2.1 สตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุด ในเนื้อ เมล็ดของข้าวเม็ดสตาร์ชมีรูปร่างลักษณะเป็นหลายเหลี่ยมและมีขนาดเล็กระมาณ 2-9 ไมครอนรวมตัวกันอยู่ภายในอะไมโลพลาสต์ (amyloplast) จำนวน 20-60 เม็ดสตาร์ชเป็นกลุ่มก้อนกลมหรือยาวรีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มเม็ดสตาร์ชในอะไมโลพลาสต์นี้ประมาณ 7-39 ไมครอนโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวที่มี ขนาดใหญ่โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยสารประกอบทางเคมี 2 ชนิด คือ อะมิโลส และอะมิโล เพกติน โดยอะมิโลสเป็น โพลีเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยต่อกันเป็น สายโซ่ยาวแบบขดเป็นเกลียวแบบอิลิกซ์ (helix) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic bond และ ส่วนน้อยเป็น α -1,6-glycosidic bond ในขณะที่อะมิโลเพกตินเป็น โพลีเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสโดย

ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic bond ในขณะที่ส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นโพลีเมอร์กลูโคสสายสั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic bond ดังแสดงในรูปที่ 2.2

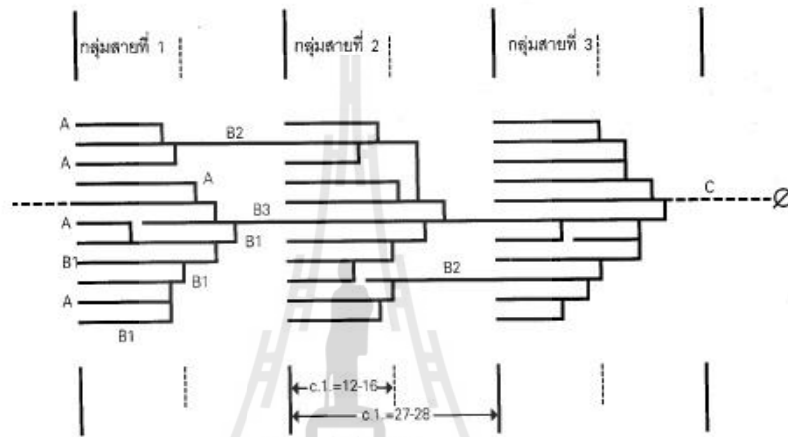


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (a) อะมิโลส (b) อะไมโลเพคติน

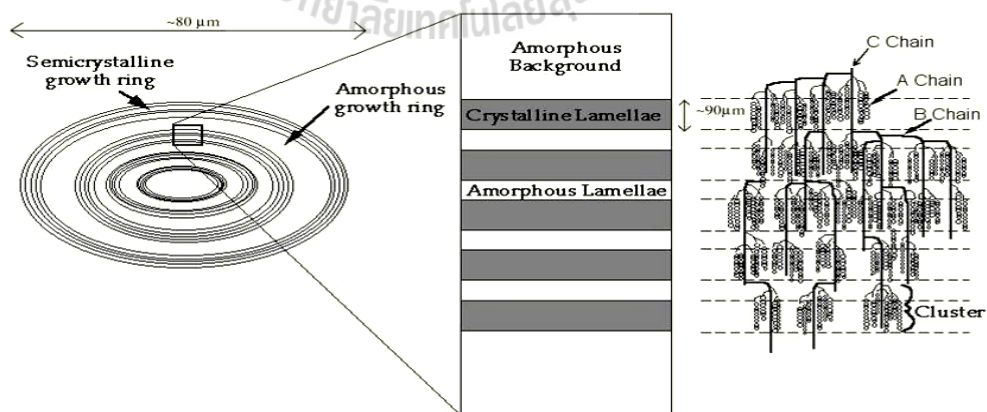
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

Hizukuri (1996) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคตินดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิดคือสาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่าสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะไมโลเพคตินจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystallite) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) ดังรูปที่ 2.4 ส่วนสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคตินจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพคติน (Jacobs and Delcour, 1998)



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยสาย A B และ C
ที่มา : Hizukuri (1996)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ของเม็ดแป้ง
ที่มา : Jacobs and Delcour (1998)

เมล็ดข้าวมีคุณสมบัติของแป้งแตกต่างกัน ขึ้นกับปริมาณอะมิโลส โดยข้าวเหนียว จะมีปริมาณอะมิโลสต่ำที่สุด อยู่ระหว่าง 0 – 2% ส่วนในพวกข้าวเจ้า ยังแบ่งออกได้อีกเป็นข้าวอะมิโลสต่ำ กลาง และสูง ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสอยู่ระหว่าง 7 – 20%, 20 – 25% และมากกว่า 25% ตามลำดับ โดยปกติเมล็ดสตาร์ชจะไม่ละลายในน้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมน้ำกับเมล็ดสตาร์ชนั้น เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเข้าไป พองตัวมากขึ้น จนในที่สุดจะแตกออก ทำให้เกิดความหนืดขึ้น เรียกว่า เจลลาคิโนเซชัน ลักษณะที่สำคัญนี้มีผลต่อการนำไปแปรรูปเป็นอาหารชนิดต่าง ๆ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ซึ่งปริมาณอะมิโลสมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวสุก ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งข้าวเหนียวการขยายปริมาตรความแข็งความขาว และความเลื่อมมันของเมล็ดข้าวสุก (Juliano, 1971) เป็นสาเหตุทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวลดลงหรือร่วนมากขึ้น และทำให้ข้าวนุ่มน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการคืนตัวของอะมิโลส (Retrogradation) (ชนิดา หันสวาสดี พิระศักดิ์ ฉายประสาท และปทุมทริกา รัตนตรัยวงศ์, 2548)

2.1.2.2 โปรตีน

โปรตีนในข้าวแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามสมบัติทางการละลาย คือ อัลบูมิน (albumin) มีปริมาณ 3.8-8.8% ของโปรตีนทั้งหมดเป็นโปรตีนที่ละลายในน้ำ หรือละลายในน้ำที่มีกรดอยู่เพียงเล็กน้อยและตกตะกอนทันทีเมื่อได้รับความร้อน โปรตีนนี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเอนไซม์

โกลบูลิน (globulin) มีปริมาณ 9.6-10.8% ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในน้ำเกลือ

โปรลามิน (prolamin) มีปริมาณ 2.6-3.3% ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในเอทานอลเข้มข้น 70-80%

กลูเตลิน (glutelin) มีปริมาณ 66-78% ละลายในน้ำซึ่งมีกรดหรือด่างเล็กน้อย โปรตีนชนิดนี้เป็นโปรตีนหลักที่พบอยู่เป็นจำนวนมากในข้าวและสามารถแยกออกมาได้โดยการใช้สารละลายต่างดั่งนั้นในกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวทั่วไปจึงใช้การล้างแป้งฟลาวร์ข้าวด้วยสารละลายต่าง โปรตีนในข้าวมีกลูเตลินเป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโอริซีนิน (Oryzenin) (Matsuo, Futsuhara, Kikuchi and Yamaguchi, 1997)

2.1.2.3 ไขมัน

ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ 1-3% โดยพบมากที่สุดในส่วนของ คัพภะรองลงมาคือ ส่วนเปลือก และมีในส่วนเนื้อเมล็ดน้อยที่สุด ทำให้ในข้าวกล้องมีไขมันมากกว่าข้าวสาร คือมีไขมันอยู่ถึง 1.5-2.5% ส่วนในข้าวสารมีเพียง 0.5-1.2 % ไขมันเหล่านี้อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์ของกรดไขมันเป็นส่วนใหญ่ โดยกรดไขมันที่พบจะพบทั้งประเภทอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว และอาจอยู่ในรูปของฟอสโฟลิปิด (phospholipids) เช่น เลซิธิน (lecithin) โกลโคไลปิด

(glycolipids) เทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ไขมันสามารถทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เกิดเป็นสารกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดสารที่หักเหแสงได้ เช่นเดียวกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันก็ทำให้เกิดกลิ่นหืนได้เช่นกัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.2 คุณสมบัติของข้าวและแป้งข้าว

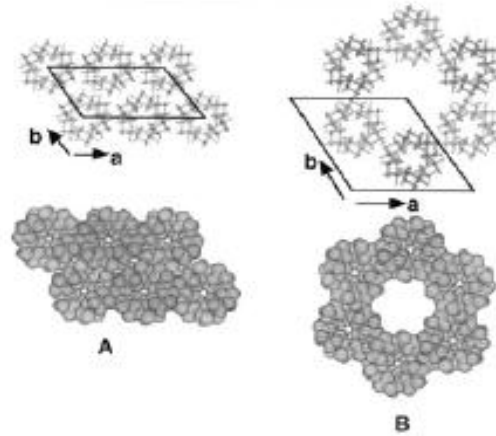
2.2.1 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ (รูปที่ 2.5) ถ้ามีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้ามีการจัดเรียงตัวกันหลวม ๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะเกิดผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) นอกจากนี้ยังมีอีกรูปแบบหนึ่งคือ โครงสร้างผลึกแบบ V พบในสตาร์ชที่มีอะมิโลสสูงบางชนิด แต่โดยทั่วไปเป็นสตาร์ชที่เกิดเจลาตินไนซ์แล้วจับตัวกับไขมัน (Zobel, Young and Rocca, 1988)

แป้งสตาร์ชมีโครงสร้างผลึกแบบกึ่งผลึก (semi-crystallinity) คือมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) โครงสร้างผลึกที่ต่างกันของแป้งสตาร์ชจะส่งผลให้มีลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ลักษณะทางโครงสร้างและปริมาณผลึกสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคทางการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry) ซึ่งแป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีกคู่ (doublet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ $17-18^\circ$ และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 23° แต่ไม่มีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6° ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่แป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17° แต่ไม่มีพีกที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 18° และมี doublet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 22 และ 24° ซึ่งจะพบในแป้งสตาร์ชที่มาจากพืชหัว ส่วนแป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มี singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 และ 17.9° ตัวอย่างเช่น แป้งสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้น และแป้งสตาร์ชจากผลไม้บางชนิด นอกจากนี้ลักษณะผลึกแบบ V ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดจากการรวมตัวกันของอะมิโลสกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 13 และ 20° (รูปที่ 2.6) (Buleon, Colonna, Planchot and Ball, 1998)

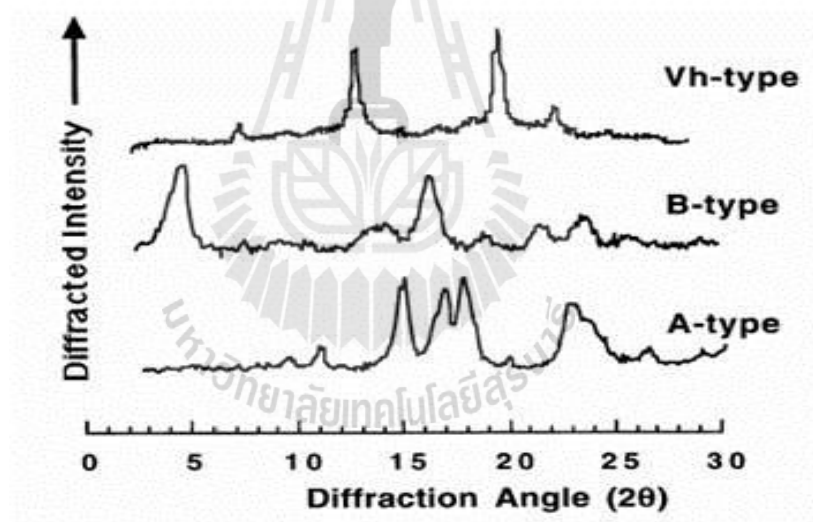
2.2.2 สมบัติการเกิดเจลาตินไนซ์

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยากในขณะที่แป้ง



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B

ที่มา : Buleon et al. (1998)

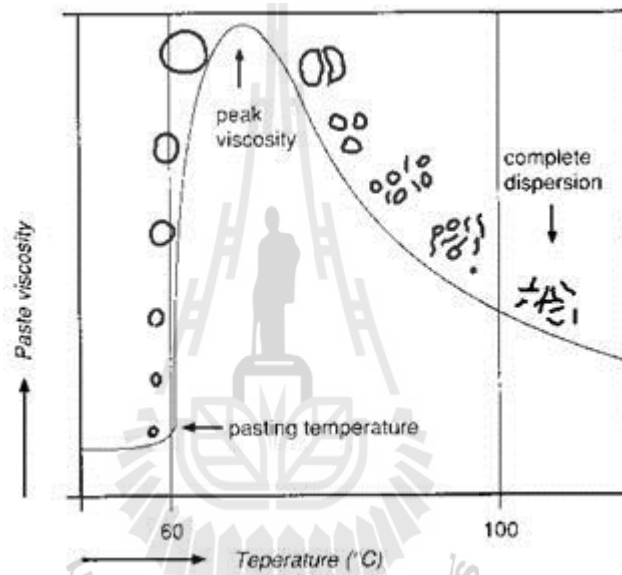


รูปที่ 2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A, B และ Vh

ที่มา : Buleon et al. (1998)

อยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งสามารถดูดน้ำและพองตัวได้เพียงเล็กน้อยแต่เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งพองขึ้นและใส โครงสร้างจะคลายตัวลงทำให้เม็ดแป้งสามารถดูดน้ำและพองตัวได้มากขึ้นทำให้น้ำแป้งมีความหนืดมากขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลงเม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นเกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลาตินไนซ์เซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสต์ (pasting temperature) ดังรูปที่

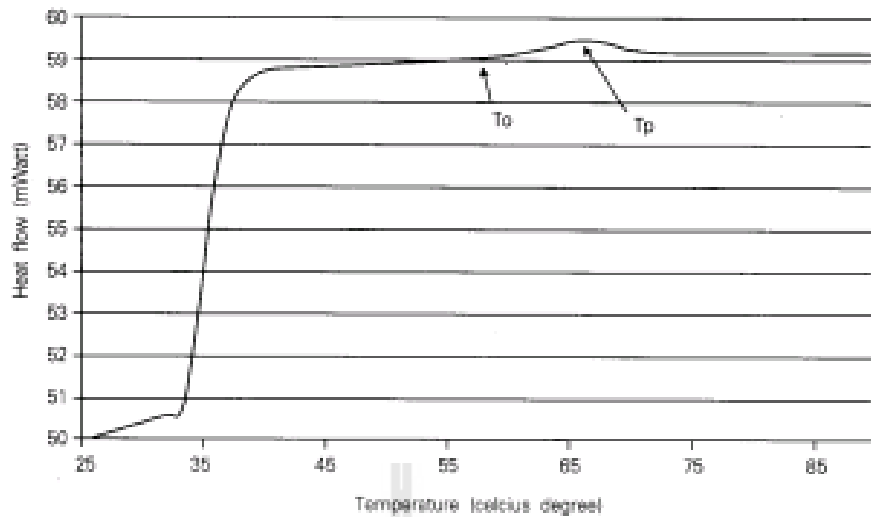
2.7 ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของแป้งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) (รูปที่ 2.8) และให้ผลเป็นค่าพลังงานเรียกว่าค่าเอนทาลปี (ΔH) (Zobel et al., 1988) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของแป้งได้แป้งที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมากมีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันมากเนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการพอง



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน
ที่มา : กล้าณรงค์ ศิริรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.3 การแปรรูปอาหารโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเฉือน เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่าง ๆ ได้แก่ การผลิตอาหารขบเคี้ยวประเภทพองตัวทันที อาหารขบเคี้ยวประเภทที่ต้องผ่านกระบวนการเพื่อให้เกิดการพองตัวในภายหลัง อาหารเซ้าชูชาติ พาสต้า เป็นต้น เป็นกระบวนการที่รวมหลาย ๆ กรรมวิธีเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การต้ม การนวด การเนียน การขึ้นรูป ซึ่งในการผลิตอาหารด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีข้อดีมากมาย ทำให้กระบวนการแปรรูปอาหารง่ายขึ้น (วิลโลว์ รังสาทอง, 2547) เพิ่มความหลากหลายของอาหาร โดยเพิ่มชนิดของอาหารจากส่วนผสมพื้นฐานให้มี รูปร่าง



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำ (30 : 70) (To = Onset temperature, Tp = Peak temperature)

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

เนื้อสัมผัส สี กลิ่น รส แบบต่าง ๆ เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประหยัดเวลา พลังงานและแรงงาน รวมถึงพื้นที่สำหรับการผลิต ให้อัตราการผลิตสูง นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่ใช้ อุณหภูมิสูง เวลาสั้น (HTST) ซึ่งสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของ เอนไซม์ได้อีกด้วย (Harper, 1981)

2.3.1 หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์

หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์ คือ วัตถุดิบจะถูกส่งไปที่ส่วนรับวัตถุดิบ (feed hopper) จากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเอกซ์ทรูเดอร์ วัตถุดิบจะหลอมเหลวอยู่ในรูปคล้ายพลาสติก เนื่องจากความดันสูง อุณหภูมิสูง และแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นในบารเรล จากนั้นวัตถุดิบ จะอยู่ในรูปของโด และเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการหมุนของสกรู ช่วงระยะที่ผ่านตัวเอกซ์ทรูเดอร์นี้ โดจะถูกทำให้สุกเนื่องจากเกิดการเจลาติไนซ์เซชัน และทำให้เกิดรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน (die) ซึ่งเป็นรูเปิดหรือช่องอยู่ส่วนสุดท้ายของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541)

2.3.2 ประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอกซ์ทรูด

- 1) ผลิตภัณฑ์กรอบพองสุกทันที (direct expanded products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันทีเมื่อออกจากหน้าแปลนของเครื่องอัดพองและไม่ต้องแปรรูปอื่นนอกจากการทำแห้ง
- 2) ผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่พองสุกทันที (indirect expanded products) หรือเรียกว่า ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (half products หรือ intermediate products) จำกััดความของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปหมายถึงผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จากการทำแป้งให้สุกหรือเหนียวจนกระทั่งกลายเป็น

เจล (แป้งสุก) ได้อย่างสมบูรณ์แล้วอัดผ่านรูเปิดของหน้าแปลนหรือรีดให้เป็นแผ่นออกมาแล้วตัดเป็นชิ้นหรือแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นจนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 12 โดยน้ำหนักหรือน้อยกว่าเพื่อให้เก็บไว้ได้นานแต่เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนของกระบวนการผลิตเพิ่มเข้ามาอีกจึงจะรับประทานได้ซึ่งขั้นตอนการผลิตที่เพิ่มเข้ามานี้เป็นตัวทำให้เกิดรูปร่างปรากฏขึ้นหรือเกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เป็นจริงตามสภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ตามแบบชนิดของขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตที่เพิ่มเข้ามาซึ่งอาจประกอบด้วยการทอดในน้ำมันการอบด้วยความร้อนสูงหรือการต้มสุก (ประชา บุญศิริกุล, 2537)

2.3.3 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

แบ่งประเภทของเครื่องอัดพองตามจำนวนสกรูแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

- 1) เครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) เป็นเครื่องอัดพองแบบที่มีสกรู 1 อันวางตลอดภายในตัวเครื่อง
- 2) เครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) เป็นเครื่องอัดพองที่ประกอบด้วยสกรู 2 อันมีความยาวเท่ากันอยู่ในบารเรลเดียวกันเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ยังแบ่งได้หลายชนิดขึ้นกับแบบของสกรู (screw configuration) โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของสกรูทั้งคู่ (แบบหมุนตามกันและแบบหมุนตรงข้ามกัน) และลักษณะของสกรูที่ซ้อนกัน (สกรูซ้อนกันและสกรูไม่ซ้อนกัน)

อย่างไรก็ตามเครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยวมีการใช้ประโยชน์ค่อนข้างจำกัดและมักมีปัญหาในการส่งผ่านส่วนผสมที่มีความหนืดต่ำเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่จะเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากใช้ได้กับวัตถุดิบหลายประเภทรวมทั้งใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นหลายระดับและวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันปานกลางด้วย (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541)

การเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบที่เกิดขึ้นภายในบารเรล ส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ จำนวนมาก ทั้งทางด้านเครื่องมือและวัตถุดิบ เช่น ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ รูปแบบการจัดเรียงสกรู ความเร็วรอบสกรู อุณหภูมิของบารเรล อัตราการป้อนวัตถุดิบ ความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเรล รูปแบบของหน้าแปลน ค่าแรงที่ทำให้หมุน (Torque หรือค่าแรงทอร์ก) ความดันที่บริเวณหน้าแปลน เป็นต้น (Chang, 2003) น้ำทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนและเป็นสารหล่อลื่น ช่วยในการควบคุมความดันและแรงเฉือนภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Bhattacharya and Hanna, 1987) Chaiyakul, Jangchud, Jangchud, Wuttijumnong and Winger (2009) ทำการศึกษาผลของสภาวะของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของขนมพองกรอบที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวเสริมโปรตีน พบว่าที่ปริมาณความชื้นต่ำส่งผลให้อุณหภูมิที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดการเจลลาติไนซ์เพิ่มขึ้นทั้ง Akdogan (1996) ที่ทำการศึกษาผลของความดัน ค่าแรงทอร์ก และพลังงานตอบสนองของกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ที่มีต่อ

สตาร์ชข้าวความชื้นสูง (57, 60 และ 65%) และ Chuang and Yeh (2004) ที่ทำการศึกษาผลของการเรียงสกรูต่อระยะเวลาที่อาหารอยู่ในบารเรล และการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของฟลาวัวร์ข้าวระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของบารเรลเพิ่มขึ้น แรงทอร์กจะมีค่าลดลง โดยแรงทอร์กแสดงถึงแรงต้านทานต่อการหมุนของสกรูของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนืดของอาหารภายในบารเรลทั้ง Ding, Ainsworth, Tucker and Marson (2005) ที่ทำการศึกษาศึกษาผลของสภาวะของกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของขนมพองกรอบที่ผลิตจากแป้งฟลาวัวร์ข้าวและผลการศึกษาของ Chaiyakul et al. (2009) และ Guha et al. (1997) พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้น ความหนืดของอาหารภายในบารเรลจะลดลง ทำให้มีแรงต้านทานต่อการหมุนต่ำ ค่าแรงทอร์กจึงลดลง Singh, Sekhon and Singh (2007) ทำการศึกษาผลของความชื้น อุณหภูมิ และระดับของการเติมแป้งถั่วลิสงที่มีต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว พบว่าการเพิ่มอัตราป้อนวัตถุดิบมีผลทำให้ค่าแรงทอร์ก ค่าความแข็ง (hardness) และการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น การขยายตัวของผลิตภัณฑ์จะต่ำลง เนื่องจากเวลาที่อาหารอยู่ในบารเรลต่ำ จึงทำให้การเกิดเจลลาติไนซ์เซชันอยู่ในระดับที่ต่ำลงและแรงทอร์กจะมีค่าลดลงความดันที่หน้าแปลนจะลดลงเมื่อความชื้นและอุณหภูมิบารเรลมีค่าสูงขึ้นจากการศึกษาผลของอุณหภูมิบารเรลและความเร็วรอบสกรูที่มีต่อกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ของฟลาวัวร์ข้าว และคุณสมบัติของเอกซ์ทรูเดตของ Guha, Ali and Bhattacharya (1997) และจากผลการทดลองของ Chaiyakul et al. (2009) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลส่งผลให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ค่าแรงทอร์ก ความหนาแน่น และความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำลง นอกจากนี้จากผลการศึกษาของ กมลวรรณ แจ่มชัด (2541) พบว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ยังมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันที เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกจากเครื่องเกิดจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกต่ำกว่า 100°C จากผลการศึกษาคุณสมบัติของแป้งมันฝรั่งจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันของ Cheyne, Barnes, Gedney and Wilson (2005) และการศึกษาผลของอุณหภูมิบารเรล และความเร็วรอบสกรูที่มีต่อพฤติกรรมความหนืดของแป้งข้าวของ Guha et al. (1998) พบว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะมีความสามารถในการดูดน้ำ (hydrate) ได้เร็วกว่าแป้งตามธรรมชาติ

2.4 ข้าวหุงสุกเร็ว

ข้าวหุงสุกเร็ว (Quick-Cooking Rice) เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถลดระยะเวลาในการเตรียมเพื่อบริโภค โดยการทำให้เมล็ดข้าวเกิดเจลาตินในซ้บางส่วน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการเพื่อให้เมล็ดเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและรอยร้าวเพื่อให้เมล็ดข้าวดูดน้ำได้เร็ว และคงสภาพของเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์ไว้ (Keneaster, 1974) ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการคิดค้นและพัฒนากรรมวิธีในการแปรรูปข้าวสารเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็ว และจดสิทธิบัตรไว้มากมาย ซึ่ง Roberts (1972) ได้แบ่งกรรมวิธีการแปรรูปข้าวหุงสุกเร็วตามลักษณะการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ออกแบบให้เหมาะสมต่อกรรมวิธีการแปรรูปที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

การแช่น้ำ-ต้มไอน้ำ-ทำแห้ง (Soak-boil-steam-dry method) โดยนำข้าวสารมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนมีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 30% แล้วต้มข้าวในน้ำร้อนจนข้าวมีความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึง 65 - 70% ทำแห้งให้ข้าวมีความชื้นลดลงเป็น 8 - 14% จุดสำคัญในสภาวะการทำแห้งนั้นคือ อุณหภูมิลมร้อนต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้ความชื้นระเหยจากผิวเมล็ดข้าวเร็วกว่าความชื้นจากภายในเมล็ดออกสู่บรรยากาศ เพื่อให้เนื้อเมล็ดข้าวเป็นรูพรุน จะได้กินรูปเร็ว

การทำให้เมล็ดข้าวพองตัวและเกิดเจลาตินในซ้ (Gelatinize-dry-puff method) โดยนำข้าวสารมาแช่น้ำ นำไปต้ม และ ึ่งไอน้ำ จนเมล็ดข้าวสุก ทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมล็ดข้าวจะหดตัวและมีลักษณะใส ทำให้พองที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เมล็ดข้าวมีรูพรุน

การกดหรือบดข้าวหุงสุก (Rolling or Bumping method) โดยใช้ข้าวหนึ่งหรือข้าวที่ทำให้สุก นำมากดหรือบดให้แบนลง แล้วทำแห้งที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ข้าวมีรูพรุนมาก

การใช้ความร้อนแห้ง (Dry-heat method) Alexander (1954) ใช้ความร้อนแห้งในการลดความชื้นข้าวสารและข้าวกล้อง ด้วยลมร้อน 57 - 82°C เป็นเวลา 10 - 30 นาที ทำให้ผิวเมล็ดข้าวเป็นรอยร้าว จึงสามารถดูดซึมน้ำขณะหุงต้มได้เร็วขึ้น ส่วน Bardet and Giesse (1961) ใช้ความร้อนแห้งกับข้าวกล้องด้วยลมร้อน 272°C เป็นเวลา 17.5 วินาที เพื่อให้ผิวเปลือกข้าวกล้องร้าวแล้วทำให้เย็นลงทันทีด้วยลมเย็น ทำให้เมล็ดข้าวขุ่น ผิวเมล็ดร้าว และมีการพองตัวเล็กน้อย

การแช่เยือกแข็ง (Freeze-thaw method) โดยนำเมล็ดข้าวสุก (ความชื้น 70%) แช่ในห้องเย็น 0°C เป็นเวลา 1 - 3 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำกลายเป็นผลึกน้ำแข็งและทำลายโครงสร้างของสตาร์ช ทำให้เมล็ดข้าวเป็นรูพรุน ดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น แล้วลดอุณหภูมิให้ต่ำลงจนแช่เยือกแข็งสมบูรณ์ นำมาคืนรูปที่อุณหภูมิห้องหรือใช้ลมอุ่นเป่า 5 ชั่วโมงหรือมากกว่า แล้วอบแห้ง

การพองตัวจากเครื่องอัดแบบปืน (Gun-puffing) โดยนำข้าวสารมาปรับความชื้นเป็น 20 - 22% ที่อุณหภูมิ 33°C ใส่ในหม้อไอน้ำหรือเครื่องอัดพองแบบปืน ลดความดันลงต่ำกว่า

0.061 kg/cm² จนข้าวสุกทั่วทั้งเมล็ด ทำให้พองโดยลดความดันอย่างรวดเร็วจนถึง 3.5 - 5.6 kg/cm² แล้วทิ้งไว้ 5 - 10 นาที นำไปทำแห้งจนมีความชื้น 20 - 30%

การทำแห้งเยือกแข็ง (Freeze-drying) โดยนำข้าวที่หุงสุกมาเยือกแข็งในสภาพสุญญากาศ หรือใช้สารให้ความเย็นยิ่งยวด นำไปใส่ตู้ทำแห้งเยือกแข็ง แล้วทำแห้งด้วยลมร้อน

การใช้สารเคมี (Chemical treatment) เช่น โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไคโซเดียมฟอสเฟต สารช่วยลดแรงตึงผิว

Roberts et al. (1979) ได้ประยุกต์ใช้ระบบการทำแห้งโดยใช้เครื่องแบบฟลูอิดไคซ์เบดและหมุนเหวี่ยง (centrifugal fluidize bed dryer) ในการแปรรูปข้าวหุงสุกเร็ว โดยนำข้าวสารแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือนานกว่า จนข้าวมีความชื้น 30 - 33% แล้วนำไปต้มให้เดือดนาน 4 - 8 นาที ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว (ข้าวเมล็ดสั้น 4 นาที ข้าวเมล็ดปานกลาง 5 นาที ข้าวเมล็ดยาว 7.5 นาที) ทำให้เย็นในน้ำเย็น ทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด และหมุนเหวี่ยงด้วยแรง 10 g ที่อุณหภูมิ 132 °C จนข้าวมีความชื้น 6 - 10% ข้าวหุงสุกเร็วที่ได้มีเนื้อสัมผัสดี และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

สุทธยา พิมพ์พิไล (2549) ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อข้าวหอมมะลิแดงกล้องแบบสุกเร็ว ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการแช่ข้าว อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าว ลักษณะการให้ความร้อนและการทำแห้ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตข้าวหอมมะลิแดงกล้องแบบสุกเร็ว คือ การแช่ข้าวหอมมะลิแดงกล้องในน้ำที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งให้สะเด็ดน้ำประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปให้ความร้อนในหม้อนิ่งความดันที่อุณหภูมิ 121 °C 15 psi นาน 2 นาที แล้วทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 60 นาที

รัตนาวดี และคณะ (2549) ศึกษาการผลิตข้าวหุงสุกเร็วขึ้นรูปจากปลายข้าวเจ้าหอมมะลิ 105 ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว โดยศึกษาปัจจัยทางด้านวัตถุดิบ พบว่า ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในปลายข้าวที่เหมาะสม คือ 35% และ 3% ตามลำดับ ในด้านปัจจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ คือ ความเร็วรอบของสกรูที่ 32 รอบต่อนาที และอุณหภูมิบารลโซนที่ 3 เท่ากับ 156 °C และจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะพัฒนาข้าวหุงสุกเร็วขึ้นรูปได้โดยใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชัน หากมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการแปรรูปที่ชัดเจนมากขึ้น และมีความเฉพาะเจาะจงกับข้าวสายพันธุ์ต่างๆ จะทำให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ อาจมีการพัฒนาข้าวหุงสุกเร็วขึ้นรูปที่มีความหลากหลายหรือเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น โดยใช้กระบวนการ

เอกซ์ทราซัน เช่น ผลิตรัณฑ์ข้าวกล้องงอกขึ้นรูปหุงสุกเร็ว ผลิตรัณฑ์ข้าวหุงสุกเร็วขึ้นรูปที่มีการเติม
วิตามินหรือสมุนไพร เพื่อพัฒนาเป็นอาหารสุขภาพต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ

ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท บดเป็นแป้งโดยใช้กรรมวิธีการบดแห้งด้วยเครื่องบดแบบค้อน (Hammer mill) จากนั้นนำไปร่อนด้วยตระแกรงร่อน โดยผ่านตระแกรงร่อนขนาด mesh no. 20 และ ค้างอยู่บนตระแกรงร่อนขนาด mesh no. 40 และเก็บแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการวิเคราะห์และทดลองต่อไป

3.1.1 การปรับความชื้นวัตถุดิบ

วัดความชื้นแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตได้ จากนั้นทำการปรับความชื้นแป้งข้าวเจ้าให้เป็น 28 และ 33% ตามต้องการ ทำการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมโดยใช้สูตรสมมูลมวล จากสมการ

$$M_2 = (M_3 X_{w,3} - M_1 X_{w,1}) / X_{w,2}$$

$$M_1 + M_2 = M_3$$

- เมื่อ
- M1 = มวลแป้งข้าวเจ้า (กิโลกรัม)
 - M2 = มวลของน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (กิโลกรัม)
 - M3 = มวลแป้งข้าวที่มีความชื้นตามต้องการ (กิโลกรัม)
 - $X_{w,1}$ = สัดส่วนความชื้นแป้งข้าวเจ้าเริ่มต้น
 - $X_{w,2}$ = ความชื้นน้ำ (100%)
 - $X_{w,3}$ = สัดส่วนความชื้นแป้งข้าวเจ้าตามต้องการ (28 และ 33%)

เก็บแป้งข้าวที่เตรียมได้ในถุงพลาสติกปิดผนึกไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสมดุลของความชื้น

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

- 3.2.1.1 ปริมาณความชื้นด้วยวิธี AOAC (1997)
- 3.2.1.2 ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี AOAC (1997)
- 3.2.1.3 ปริมาณไขมันด้วยวิธี AOAC (1997)

3.2.2 การหาปริมาณอะมิโลส

ทำตามวิธีการของ Juliano (1971) โดยชั่งแป้ง 0.10 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรเติมเอทานอลความเข้มข้น 95% ปริมาณ 1 มิลลิลิตรเขย่าเบา ๆ เพื่อให้แป้งกระจายตัวเต็มสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาณ 9 มิลลิลิตรนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 10 นาทีทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรดูดสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมได้มา 5 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาณ 1 มิลลิลิตรและสารละลายไอโอดีนปริมาณ 2 มิลลิลิตรแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีนำไปวัดค่าความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตรโดยใช้อะมิโลสในการสร้างกราฟมาตรฐาน โดยนำอะมิโลส 0.04 กรัมเตรียมเป็นสารละลายแป้งเช่นเดียวกับตัวอย่างทิ้งไว้ค้างคืนเขย่าให้เข้ากันแล้วดูดสารละลายอะมิโลสมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตรใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตรจากนั้นเติมกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิลิตรตามลำดับเติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตรลงในแต่ละขวดแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตรทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของอะมิโลสกับค่าการดูดกลืนแสงคำนวณปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐานแล้วแสดงค่าเป็น % โดยน้ำหนัก

3.3 การศึกษาสถานะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

การผลิตข้าวขึ้นรูปจากแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่หมุนตามกัน (co-rotating intermeshing twin screw extruder: APV MPF19:25, APV Baker, Inc., Grand Rapid, MI, USA) ซึ่งเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วยสกรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาวเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D) เท่ากับ 25:1 มีรูปแบบการจัดเรียงสกรูเป็นแบบผลิตภัณฑ์ไม่พองตัว (non-expanded product) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในขณะที่ผนังบารเลมมีหน่วยให้ความร้อนที่สามารถแบ่งการควบคุมอุณหภูมิได้ 4 ช่วง โดยควบคุมอุณหภูมิของบารเลมในช่วงที่ 1 ไว้ที่ 55 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิของบารเลมช่วงที่ 2, 3 และ 4 ไว้ที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน เป็น 2 ระดับคือ 90 และ 110 องศาเซลเซียสตามลำดับ (ตารางที่ 3.2) และป้อนแป้งข้าวเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ผ่านทางถังป้อน ที่ได้ตั้งมีเกลียวสกรูเป็นตัวป้อนแบบปริมาตร (K-tron Crop., Pitman, NY, USA) ป้อนวัตถุดิบด้วยอัตราประมาณ 0.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

โดยวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นั้นทำการปรับความชื้นให้มีปริมาณตามที่ต้องการสองระดับคือ 28% และ 33% รูปแบบการตั้งอุณหภูมิบาเรลแสดงดังตารางที่ 3.1 ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาทีหน้าแปลน (die) ที่ใช้ขึ้นรูปเป็นรูปทรงเมล็ดข้าว แผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 เมื่อค่าแรงทอร์กคงที่ เก็บข้อมูลจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เช่น อุณหภูมิของเอกซ์ทรูเดต (product temperature) อุณหภูมิในแต่ละช่วงของบาเรล ค่าแรงทอร์ก (% torque) และเก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูเดต ทำแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง เก็บรักษาเพื่อทำการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการจัดเรียงสกรู (จากทางป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)

Screw element type	No. of amount
1.5D Feed screw	2
1.0D Feed screw	2
60° Forward paddle	6
1.5D Feed screw	2
1.0D Feed screw	2
60° Forward paddle	5
1.5D Feed screw	1
1.0D Feed screw	1
60° Forward paddle	3
1.0D Single lead screw	2
60° Forward paddle	5
1.0D Single lead screw	3
60° Forward paddle	3
1.0D Single lead screw	1
1.0D Disch Single lead screw	1

3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป

3.4.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป (Appearance of reformed rice)

ตรวจสอบลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้กับข้าวสารพันธุ์ชัยนาทด้วยวิธีการถ่ายรูป

ตารางที่ 3.2 การตั้งอุณหภูมิของบารेल

อุณหภูมิบารेल (°C)	อุณหภูมิบารเอลช่วงที่ 1-4 (°C)
90	55/ 90/ 90/ 90
110	55/ 110/ 110/ 110

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Exeriment run	ความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเอล (%)	อุณหภูมิบารเอลช่วงที่ 2-4 (°C)
1	28	90
2	28	110
3	33	90
4	33	110

3.4.2 การทดสอบคุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

3.4.2.1 การหาระยะเวลาในการหุงต้ม (cooking time)

ดัดแปลงจากวิธีการของ Singh et al. (2007) โดยชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5 กรัม ใส่ในกระป๋องโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตรเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาณมากเกินไปพอนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จับเวลาเมื่อตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิตัวอย่างถึง 100 °C นำตัวอย่างออกมาบีบกดด้วยกระดาษ 2 แผ่น ทุก 1 นาที ซึ่งถ้าตัวอย่างสุกสมบูรณ์แกนแข็งที่อยู่ภายในตัวอย่างจะหายไป ทำการบันทึกเวลา (นาที)

3.4.2.2 การหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม

ดัดแปลงจากวิธีการของ Sodhi, Singh, Arora and Singh (2003) โดยชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักที่ทราบแน่นอนประมาณ 5 กรัม ใส่ในกระป๋องโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาณมากเกินไปพอนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสุก ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการหุงต้ม จากนั้นนำตัวอย่างไปลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในอ่างน้ำแข็ง แล้วพักบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำเทใส่กระดาษชำระทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงต้ม

$$\text{ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังต้ม} - \text{น้ำหนักก่อนต้ม}}{\text{น้ำหนักก่อนต้ม}} \times 100$$

3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส (textural properties)

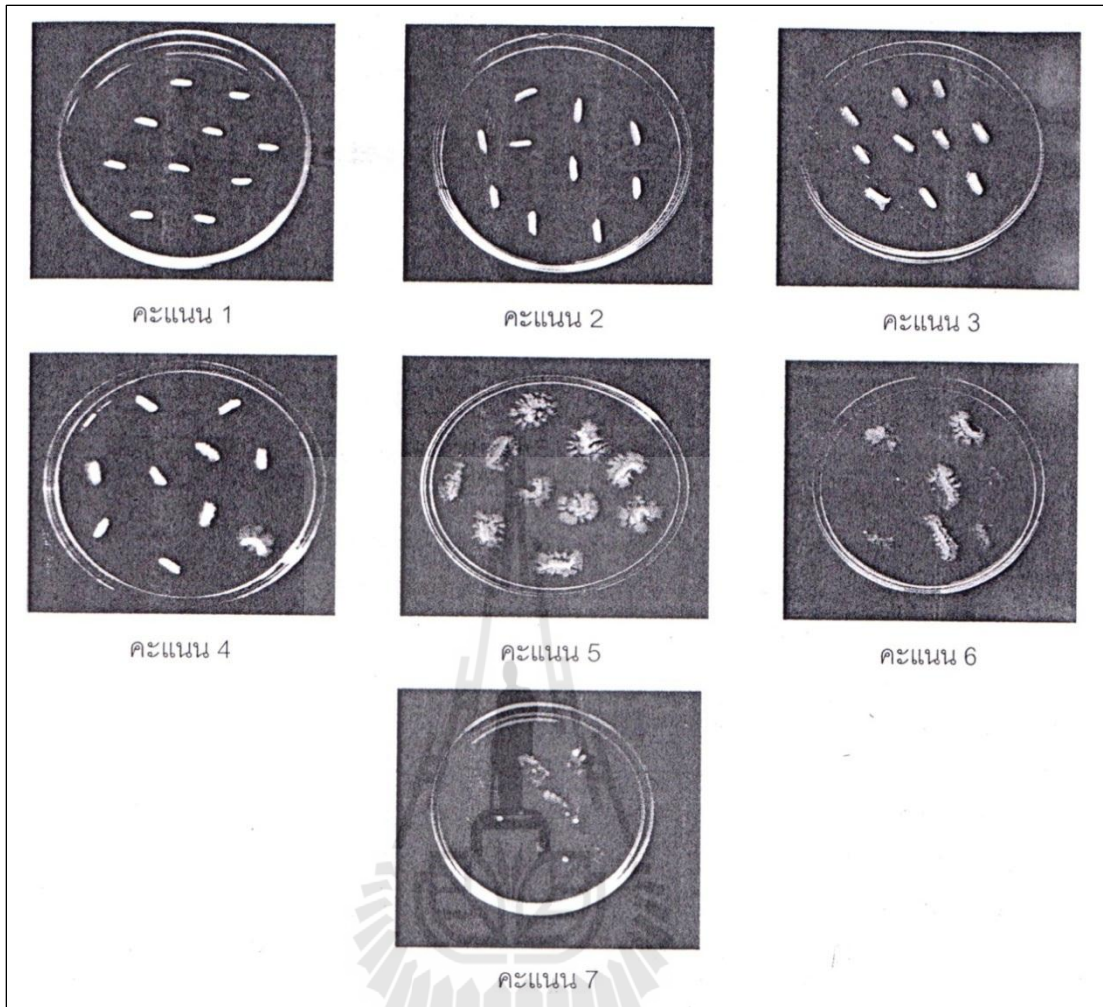
ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวสุก คัดแปลงตามวิธีการของ Leelayuthsoontorn and Thipayarat (2006) ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม ใส่กระป๋องโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นเท่ากับปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม ตามข้อ 3.4.2.2 นำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 °C จนกระทั่งสุก ขึ้นอยู่กับระยะเวลาตาม ข้อ 3.4.2.1 จากนั้นปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น 6 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นเข้าสู่สมดุล นำไปวัดสมบัติทางเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer โดยใช้หัววัด cylinder probe P/35 และกำหนดความเร็วในการวัด 5.0 mm/s วัดค่าของแรงกดอัดภายในภาชนะ (Back extrusion force) ต่อหน่วยเวลา ทำการวัดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ออกมาเป็นค่าความเหนียว (Stickiness) และค่าแรงกดอัดภายในภาชนะ (Back extrusion force)

ตารางที่ 3.4 ค่าสภาวะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส

สภาวะ	ค่า
Pre test speed	1 mm/sec
Test speed	5 mm/sec
Post test speed	5 mm/sec
Target mode	Distance
Distance	5 mm
Trigger type	Auto(force)
Time	5 sec
Trigger force	5 g

3.4.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการสลายตัวในสารละลายเบส

ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการสลายตัวในสารละลายเบส ตามวิธีการของ อรอนงค์ นัยวิกุล (2547) โดยวางเมล็ดข้าวประมาณ 6 – 10 เมล็ดลงในจานแก้วมีฝาปิด (petridish) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.7% ให้เมล็ดข้าวจมในสารละลายเบสนี้ ปิดฝาทิ้งไว้ 23 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) วัดค่าการสลายตัวเป็นคะแนน 1 ถึง 7 ดังนี้ 1 = เมล็ดข้าวยังสมบูรณ์ 2 = เมล็ดข้าวเริ่มพองตัว 3 = เมล็ดข้าวพองตัวและมีโครงร่างเมล็ดอยู่บ้าง 4 = เมล็ดข้าวพองตัวเต็มที่และไม่เห็นโครงร่างเมล็ด 5 = เมล็ดข้าวแยกจากกัน 6 = เมล็ดข้าวสลายตัวแต่ยังเห็นเนื้อเมล็ดข้าว 7 = เมล็ดข้าวสลายตัวหมดโดยไม่เห็นลักษณะเมล็ดข้าวเหลืออยู่ แสดงดังภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะเมล็ดข้าวที่สลายตัวในสารละลายเบส
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

3.4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

ทำการศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ดัดแปลงตามวิธีการของ Dexter, Dronzek and Matsuo (1978) โดยหักตัวอย่างเมล็ดข้าวสารและเมล็ดข้าวขึ้นรูปตามแนวขวาง ตัดลงบนแท่นตัดตัวอย่าง (stub) จากนั้นทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทองให้มีความหนาประมาณ 10 ไมครอนด้วยเครื่อง Sputter coated (Ion Sputtering Device JFC-110E, Japan) นำไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JSM-6400, LV, Jeol, Japan) โดยใช้ความเข้มข้นอิเล็กตรอน 10kV ที่กำลังขยาย 1,500X แล้วบันทึกภาพ

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป

3.5.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป

3.5.1.1 การวิเคราะห์ระดับการเจลาติไนเซชันของสตาร์ช (degree of gelatinization)

การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Chaing and Johnson (1977) โดยเตรียมแป้งเจลาติไนเซชันสมบูรณ์โดยการออโตเคลฟแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้น 2% (w/w) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นผสมกับเมทานอลด้วยปริมาณ 3 เท่า กรอง ทำแห้งและบดเพื่อรอใช้งานต่อไป ชั่งแป้งข้าวขึ้นรูป 25 มิลลิกรัมใน centrifuge tube ขนาด 50 มิลลิลิตร สำหรับตัวอย่างแป้งข้าวขึ้นรูปเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ตัวอย่างแป้งข้าวที่เจลาติไนเซชันสมบูรณ์ เติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาณ 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการย่อยด้วยเอนไซม์กลูโคสอะมิเลส (amylglucosidase) ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วหยุดปฏิกิริยาด้วยสารละลายไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid) ความเข้มข้น 25% ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 g เป็นเวลา 5 นาที สารละลายส่วนใสที่ได้นำมาทำปฏิกิริยากับ PGO enzyme (Sigma, P7119) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 440 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) โดยใช้สารละลายกลูโคสในการสร้างกราฟมาตรฐานคำนวณระดับการเกิดเจลาติไนเซชันจากสมการ

$$Y = [100(B-k)]/(A-k) ; k = [A(C-B)]/(A-2B+C)$$

- โดย A = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแป้งเจลาติไนเซชันสมบูรณ์
 B = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 30 นาที
 C = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 60 นาที
 k = ค่าการดูดกลืนแสงของ 1% of intact sample ที่ผ่านการย่อย 30 นาที
 Y = ระดับการเกิดเจลาติไนเซชันของตัวอย่าง (%)

3.5.1.2 ความสามารถในการอุ้มน้ำและละลายน้ำ (Water absorption index (WAI), water solubility index (WSI))

ศึกษาความสามารถในการอุ้มน้ำและละลายน้ำ ตามวิธีการของกล้าณรงค์ ศรีรอดและ เกื้อกุลปิยะ จอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยชั่งตัวอย่างแป้ง

0.5 กรัม (คิดต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) ลงในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง (ที่ทราบน้ำหนักหลอดเริ่มต้นแล้ว) เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 6 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากัน จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเขย่าด้วยความเร็ว 174 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างมาเหวี่ยงแยกส่วนใส่ออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีแยกส่วนใส (supernatant) ที่ได้ลงในจานระเหยที่ทราบน้ำหนักแล้ว และชั่งน้ำหนักส่วนใสก่อนทำการระเหยจนแห้ง ส่วนตะกอนแป้งที่ก้นหลอดให้นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการหาความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งระเหยส่วนใสบนอ่างน้ำเดือดจนแห้งและจึงนำไปอบที่ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำจานระเหยเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ประมาณ 1-2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณหาส่วนที่สามารถละลายได้ ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{Water solubility index (WSI, \%)} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนใสหลังระเหยแห้ง} \times 100 (\%)}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแป้งแห้งเริ่มต้น}}$$

$$\text{Water absorption index (WAI, กรัม/กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนแป้งหลังการปั่นเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแป้งแห้งเริ่มต้น}}$$

3.5.1.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างผลึก (Crystallinity)

ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างผลึกด้วย Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ดำเนินการที่ beam line 2.2: SAXS โดยใส่ตัวอย่างแป้งปริมาณ 20 มิลลิกรัม ลงในวัสดุใส่ตัวอย่างซึ่งปิดด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมทั้งสองด้านแล้วนำไปวิเคราะห์กำหนดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ 8keV ในการวัด รังสีเอกซ์ถูกส่งผ่านในแนวอนสู่วัสดุใส่ตัวอย่างที่วางในแนวตั้ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ระยะทางจากตัวอย่างถึงตัวรับสัญญาณ (image plate detector) เท่ากับ 300 มิลลิเมตร แปรผลการกระเจิงของรังสีเอกซ์ด้วยโปรแกรม SAXSIT 3.52

3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน

ศึกษาด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC1, Mettler-Toledo, Switzerland) โดยใส่ตัวอย่างแป้งข้าว 7 มิลลิกรัมลงในถ้วยสแตนเลส (stainless pan) แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนน้ำหนักแป้ง : น้ำเป็น 1:4 จากนั้นปิดฝาให้สนิทอบที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน

จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจาก 5 ถึง 150 องศาเซลเซียสโดยใช้ภาชนะสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิงทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (peak temperature, T_p), อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (conclusion temperature, T_c) และช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ($T_c - T_o$) โดยใช้โปรแกรม STARsoftware (Mettler-Toledo)

3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SPSS 10.0.1 (SPSS Inc., Illinois, USA) และทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

3.7 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาหาร ณ อาคารเครื่องมือ 3 ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์ชัยนาท พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมีปริมาณความชื้น 9% ปริมาณโปรตีน 6.5% ปริมาณไขมัน 0.65% และปริมาณอะมิโลส 32.9% และเมื่อทำการแบ่งกลุ่มตามปริมาณอะมิโลสพบว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาทจัดอยู่ในกลุ่มของข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง

4.2 การศึกษาเบื้องต้นการแปรรูปข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

4.2.1 คำจำกัดความของ “ข้าวขึ้นรูป”

“ข้าวขึ้นรูป” หมายถึง ข้าวที่ผ่านการแปรรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และมีรูปร่างลักษณะปรากฏเหมือน หรือคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวสาร

4.2.2 การศึกษาเบื้องต้นการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ทำการศึกษาเบื้องต้นการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยใช้ข้าวสองพันธุ์คือ ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ความชื้น 12.85 %) และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 90 มีความชื้น (11.09%) ตั้งอุณหภูมิ바เรลดังตารางที่ 4.1 และแผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KDML105) และ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 (SPBR 90) แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยมีความชื้นของแป้งข้าวภายในบาเรลอยู่ในช่วง 33 - 46% จากการทำการทดลองพบว่า สภาพการผลิตดังกล่าวไม่สามารถผลิตข้าวขึ้นรูปได้ ผลิตภัณฑ์ที่ออกสู่หน้าแปลนมีความเหลว ไม่สามารถตัดด้วยใบมีดให้มีรูปร่างลักษณะเป็นเมล็ดข้าวได้ จึงได้ทำการเปลี่ยนพันธุ์ข้าวเป็นพันธุ์ชัยนาท ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสสูง (32.9%) และจำกัดขอบเขตของการทดลองโดยลดปริมาณความชื้นลงอยู่ในช่วง 28 – 33% ทำการปรับความชื้นแป้งข้าวให้ได้ตามที่ต้องการก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปและอุณหภูมิ바เรลช่วงที่ 1 คือ 55°C อุณหภูมิ바เรลช่วงที่ 2 – 4 คงที่ที่อุณหภูมิ 90°C และ 110°C

4.3 ผลของสถานะการผลิตต่อลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป

4.3.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป (Appearance of reformed rice)

ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยเปรียบเทียบข้าวขึ้นรูปที่ได้

กับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท พบว่าข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีรูปร่างลักษณะปรากฏคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท จากผลการทดลอง พบว่าที่สภาวะการผลิตที่ความชื้น (extrusion moisture, em) 33% และอุณหภูมิบารเรล 110°C (em33% + 110°C) ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ออกจากบารเรล มีลักษณะเหนียวจนไม่สามารถตัดด้วยใบมีดให้เกิดเป็นลักษณะเมล็ดข้าวได้ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้แสดงดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 การตั้งอุณหภูมิของบารเรล

อุณหภูมิของบารเรลช่วงที่ 3 (°C)	อุณหภูมิบารเรลช่วงที่ 1-4 (°C)
95	55/ 90/ 95/ 95
120	55/ 90/ 120/ 95

ตารางที่ 4.2 แผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDML105) และ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 (SPBR 90)

สภาวะการทดลองที่	พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิบารเรลช่วงที่ 3 (°C)	ความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเรล (%)
1	KDML105	95	34.47
2	KDML105	95	41.90
3	KDML105	95	46.20
4	KDML105	120	34.47
5	KDML105	120	41.90
6	KDML105	120	46.20
7	SPBR 90	95	33.15
8	SPBR 90	95	40.73
9	SPBR 90	95	45.12
10	SPBR 90	120	33.15
11	SPBR 90	120	40.73
12	SPBR 90	120	45.12

เมื่อพิจารณาจากค่าทอร์คจะพบว่าค่าทอร์คของสภาวะการผลิตที่ em 33% +110°C มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการผลิตอื่น ๆ เนื่องจากการเพิ่มความชื้นวัตถุดิบในช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในระดับต่ำ (low water content) ทำให้อุณหภูมิกเกิดการเกิดเจลลาติในเซชันหรือ

อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของแป้งข้าวมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นทำให้เม็ดแป้งถูกทำลายได้มากขึ้น ส่งผลให้แป้งเกิดเจลลาติไนซ์เซชันได้มากยิ่งขึ้น ทำให้ได้ที่อยู่ภายในบารเรลจะมีความเหลว มีความหนืดต่ำ มีแรงต้านการหมุนของสกรูภายในบารเรลต่ำ ซึ่งค่าทอร์ค หมายถึงค่าความต้านทานต่อการหมุนของสกรูในบารเรล ซึ่งสัมพันธ์กับความหนืดของอาหารภายในบารเรลจึงทำให้ค่าทอร์คมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการผลิตอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.3 เมื่อปริมาณความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น ความหนืดของอาหารภายในบารเรลจะลดลง ทำให้ความต้านทานการหมุนของสกรูในบารเรลต่ำ ค่าทอร์คจึงต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chaiyakul, Jangchud, Jangchud, Wuttijumnong and Winger (2009); Chuang and Yeh (2004); Ding, Ainsworth, Tucker and Marson (2005); Guha, Ali and Bhattacharya (1997) ทำให้ไม่สามารถทำการตัดให้มีลักษณะเป็นเม็ดข้าวได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ออกจากบารเรลมีความหนืดน้อยไปซึ่งความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4.4

4.3.2 โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

จากการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวขึ้นรูปและข้าวสารพันธุ์ชัยนาทในภาคตัดขวาง (cross section) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าเม็ดข้าวสารพันธุ์ชัยนาทจะพบเม็ดสตาร์ชข้าวดิบซึ่งมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมอัดเรียงตัวกันดังแสดงในรูปที่ 4.3 (a) ในขณะที่ข้าวขึ้นรูปจะไม่พบลักษณะดังกล่าว คือไม่พบลักษณะรูปหลายเหลี่ยมของเม็ดสตาร์ชข้าว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (b), (c) และ (d) เนื่องจากข้าวขึ้นรูปผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อน โดยเป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเฉือน ทำให้โมเลกุลของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายด้วยแรงกล แรงเฉือนและความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเปิดออกทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายใน ทำให้เม็ดสตาร์ชของข้าวขึ้นรูปเกิดการหลอมเหลว และสูญเสียโครงสร้างที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมไป เมื่อพิจารณาภาคตัดขวางของข้าวขึ้นรูปในทุกสภาวะการทดลอง พบว่ามีลักษณะเป็นแป้งหลอมตัวอัดกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าทอร์ค (%) ที่สภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°C)	Torque (%)
28	90	40 ^a
28	110	30 ^{ab}
33	90	25 ^{bc}
33	110	18 ^c

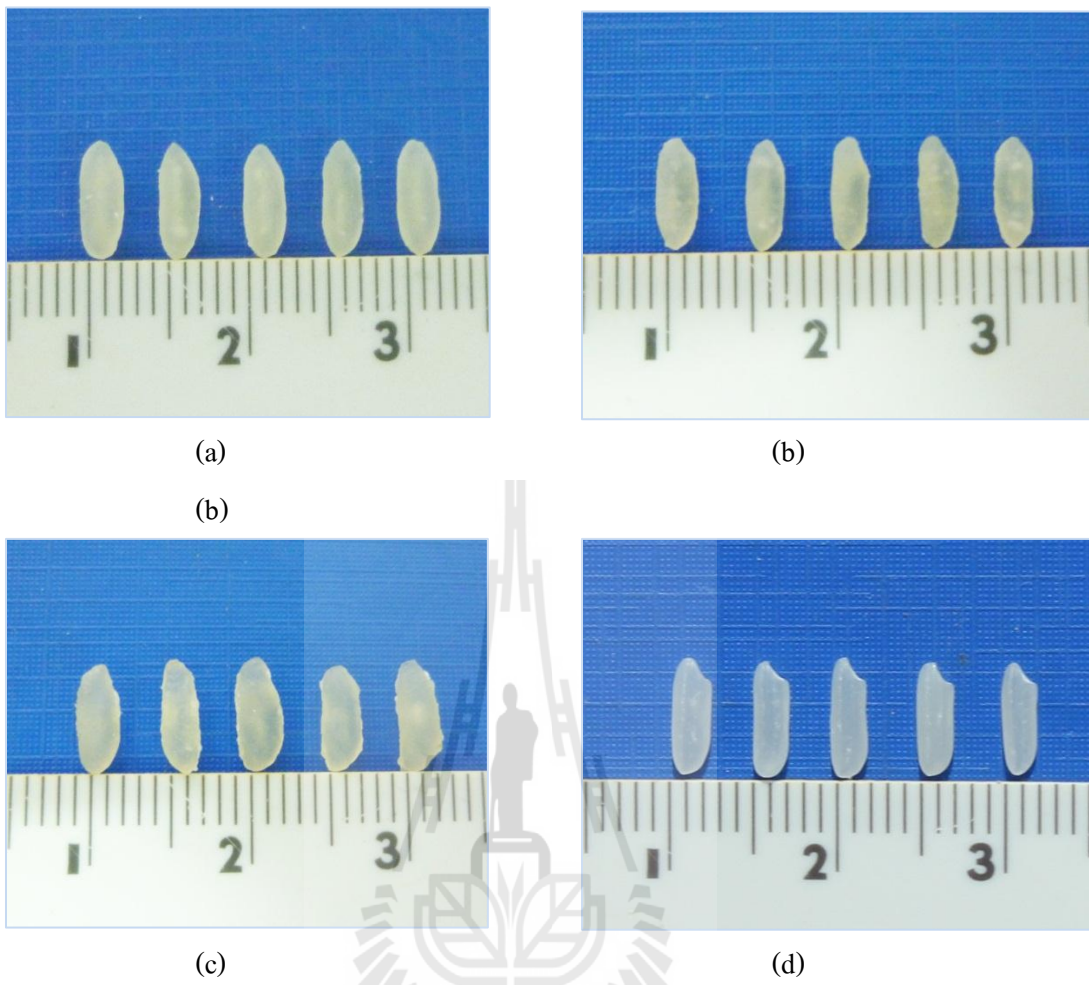
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูป

สภาวะการทดลอง	ความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูป
em 28% + 90°C	แป้งข้าวที่ทำการเอกซ์ทรูด สามารถตัดด้วยใบมีดตัดได้ลักษณะข้าวเป็นเม็ล็ด ตัดได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสภาวะการทดลอง
em 28% + 110°C	แป้งข้าวที่ทำการเอกซ์ทรูด สามารถตัดด้วยใบมีดตัดได้ลักษณะข้าวเป็นเม็ล็ดตัดได้ดีพอประมาณ แป้งข้าวที่ออกจากหน้าแปลนจะเหลวกว่าที่สภาวะการทดลองที่ 1 เล็กน้อย
em 33% + 90°C	แป้งข้าวที่ทำการเอกซ์ทรูด สามารถตัดด้วยใบมีดตัดได้ลักษณะข้าวเป็นเม็ล็ดตัดได้ดีพอประมาณ แป้งข้าวที่ออกจากหน้าแปลนจะเหลวกว่าที่สภาวะการทดลองที่ 1 และ 2 เล็กน้อย
em 33% + 110°C	แป้งข้าวที่ทำการเอกซ์ทรูด มีลักษณะเหลว และเหนียวเหนียว เมื่อตัดด้วยใบมีดตัดแล้วแป้งข้าวติดใบมีดตัด ดึงแป้งข้าวให้ยืดออก ไม่สามารถตัดให้เป็นเม็ล็ดข้าวได้ (รูปที่ 4.2)

4.3.3 สมบัติการสลายตัวในสารละลายเบส

การทดสอบการสลายตัวของข้าวขึ้นรูปในสารละลายเบสเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อแช่เม็ล็ดข้าวขึ้นรูปในสารละลายเบสทิ้งไว้ 23 ชั่วโมง ข้าวขึ้นรูปมีค่าการสลายตัวในสารละลายเบสที่ระดับคะแนนสูงสุด คือ ระดับคะแนน 7 เม็ล็ดข้าวสลายตัวหมดโดยไม่เห็นลักษณะเม็ล็ดข้าวเหลืออยู่ ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมีค่าการสลายตัวในสารละลายเบสที่ระดับคะแนนต่ำกว่า คือ ระดับคะแนน 6 เม็ล็ดข้าวสลายตัวแต่ยังเห็นเนื้อเม็ล็ดข้าวอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.4 การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าข้าวขึ้นรูปมีความสมบูรณ์ (integrity) ของเม็ล็ดต่ำกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท เนื่องจากข้าวขึ้นรูปเกิดจากการแปรรูปจากแป้งข้าวโดยผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้สูญเสียโครงสร้างของเม็ล็ดที่มีตามธรรมชาติไปและสูญเสียโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูลซึ่งสัมพันธ์กับผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (รูปที่ 4.3) เมื่อทดสอบโดยการแช่ในสารละลายเบสพบว่าสารละลายเบสจะสามารถแทรกซึมเข้าสู่เม็ล็ดข้าวขึ้นรูปได้ดีกว่าเม็ล็ดข้าวสารที่ยังมีโครงสร้างของเม็ล็ดตามธรรมชาติอยู่ จึงทำให้มีระดับการสลายตัวในสารละลายเบสที่คะแนนสูงกว่าและสูงที่สุด คือ ระดับคะแนน 7 ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมีระดับการสลายตัวในสารละลายเบสที่คะแนนต่ำกว่า คือ ระดับคะแนน 6



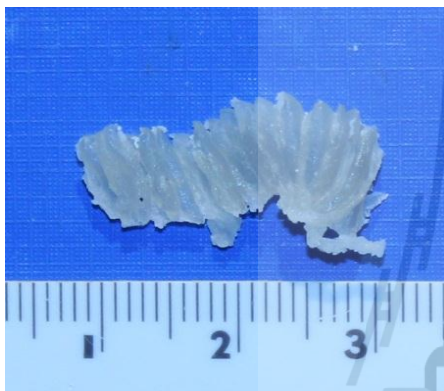
รูปที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90°C
 (b) em 28% + 110°C (c) em 33% + 90°C (d) ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท
 (em : extrusion moisture)



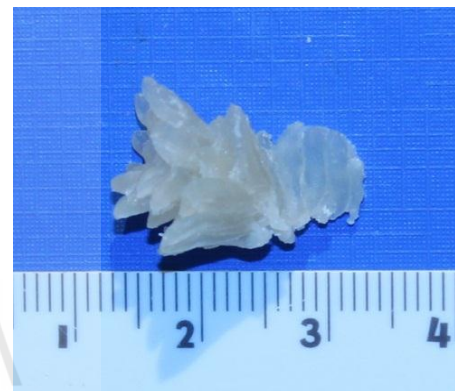
(1)



(2)



(3)



(4)

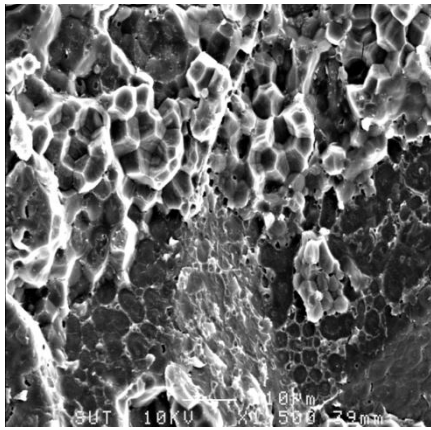


(5)

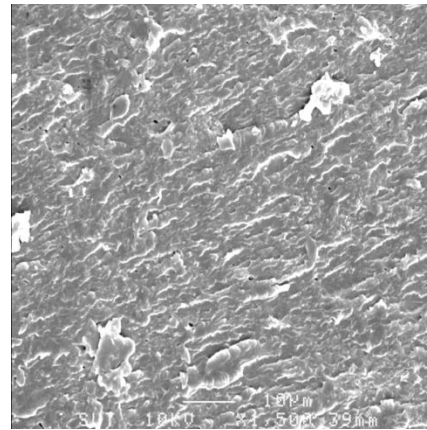


(6)

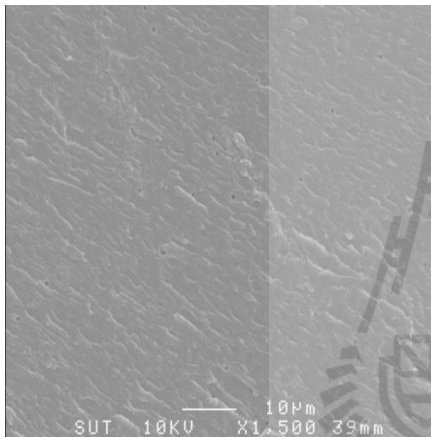
รูปที่ 4.2 ลักษณะของตัวอย่างที่ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้ที่สภาวะการผลิตที่
em 33% + 110°C



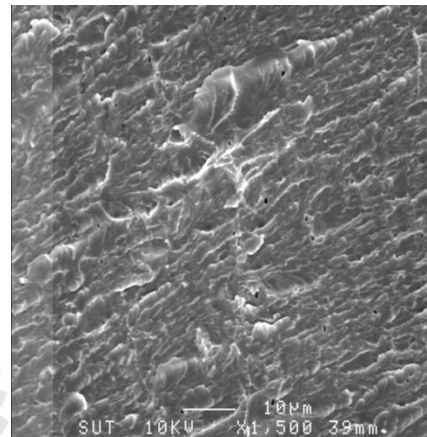
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของข้าวต่างๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) : ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90°C (b) em 28% + 110°C (c) และ (d) em 33% + 90°C

ตารางที่ 4.5 ระดับการสลายตัวในสารละลายเบสของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท

ตัวอย่าง	ระดับการสลายตัวในสารละลายเบส
28% mc, 90°C	7
28% mc, 110°C	7
33% mc, 90°C	7
33% mc, 110°C	-
Chainat rice grain	6

4.4 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป

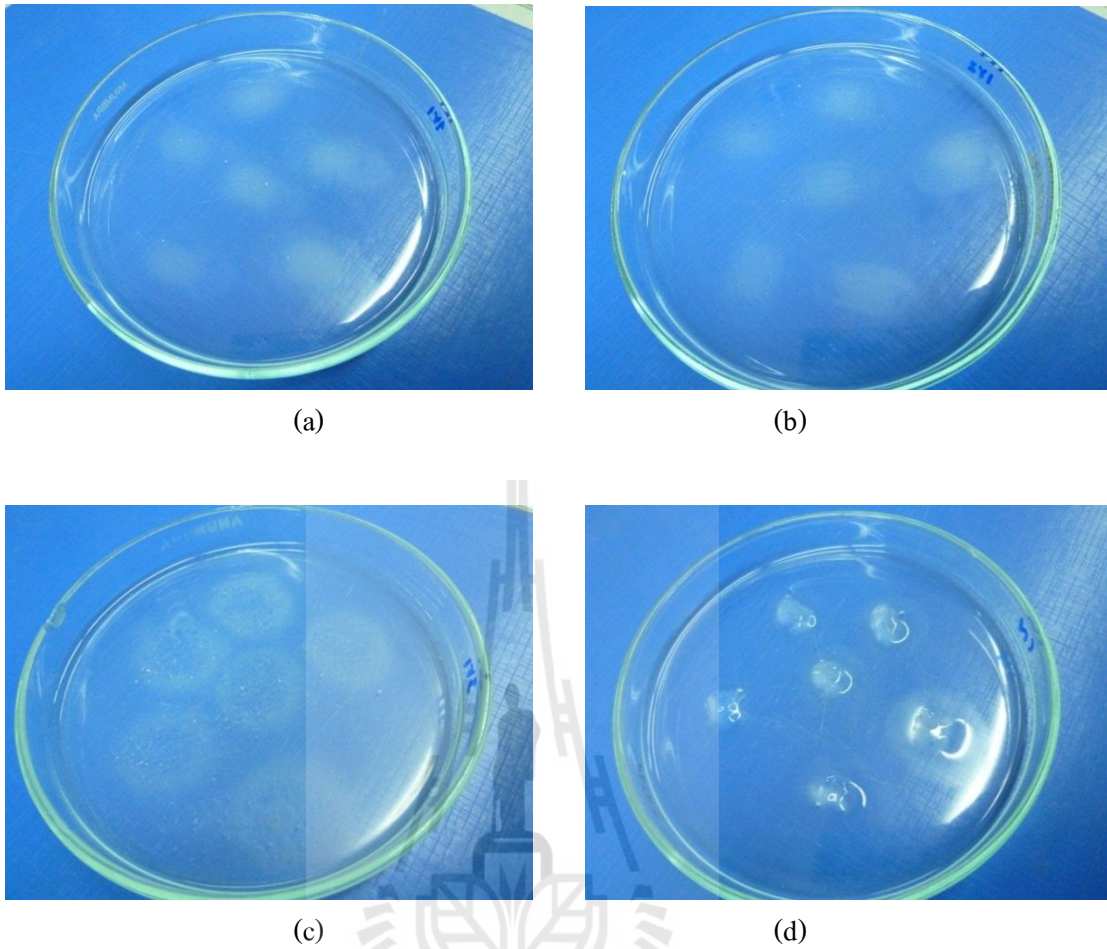
4.4.1 ระดับการเกิดเจลลาคีในเซชัน (Degree of gelatinization, DG)

การศึกษา ระดับการเกิดเจลลาคีในเซชันของแป้งข้าวขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าระดับการเกิดเจลลาคีในเซชันของแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท โดยอยู่ในช่วง 38 - 65% โดยความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลมมีผลต่อระดับการเกิดเจลลาคีในเซชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิบารเลมเพิ่มขึ้น DG จะมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความชื้นของวัตถุดิบที่ 28 และ 33% เป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำ (low water content) การเพิ่มความชื้นในช่วงนี้ทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาคีในเซชันหรืออุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของแป้งข้าวมีค่าลดลง (Roos, 1995) จึงทำให้แป้งข้าวสามารถเกิดการเจลลาคีในเซชันได้มากขึ้นส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลาคีในเซชันของข้าวมียุ่ค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นส่วนเมื่ออุณหภูมิภายในบารเลมเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับการเกิดเจลลาคีในเซชันสูงขึ้น (Chinnaswamy and Hanna, 1988) เนื่องจากอุณหภูมิบารเลมที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานภายในระบบทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นปริมาณความร้อนที่ได้รับมากขึ้นความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในระบบมีปริมาณมากพอในการทำลายเม็ดแป้งที่ปริมาณความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลมสูง โครงสร้างของเม็ดแป้งภายในบารเลมจะถูกทำลายได้มากกว่า (Bilal, Page, Maurice and Juliano, 1986) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเจลลาคีในเซชันได้มากขึ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wani et al. (2012) ที่ทำการศึกษาค่าของโครงสร้างพื้นฐาน ความร้อน และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน ที่พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลายมากขึ้น และเมื่อได้รับความชื้นแป้งจะดูดน้ำ เกิดการพองตัว และโครงสร้างผลึกเกิดการหลอมเหลว แป้งจะสูญเสียไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) และเกิดเจลลาคีในเซชันมากขึ้น และสัมพันธ์กับผลการทดลองของ Zhuang et al. (2009) ที่ทำการศึกษาค่าของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวอินดิคาที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิบารเลมเพิ่มขึ้น DG จะมีค่ามากขึ้น

4.4.2 ดัชนีการดูดซับน้ำและการละลาย

ผลการศึกษาดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI) และค่าดัชนีการละลาย (Water Solubility Index, WSI) แสดงดังตารางที่ 4.7

WAI และ WSI ของแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท เมื่อความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลมเพิ่มขึ้น ค่า WAI มีค่ามากขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้ง เมื่ออุณหภูมิบารเลมและความชื้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้นหลังจากแป้งได้รับความร้อนทำให้โครงสร้างของแป้งเปิดมากขึ้น น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดแป้งได้มากขึ้น (Artz, Warren and Villota, 1990) สัมพันธ์กับระดับการเกิดเจลลาคีในเซชัน ทำให้ค่า DG สูงขึ้น (ตารางที่ 4.6)



รูปที่ 4.4 ลักษณะของเมล็ดข้าวขึ้นรูปและข้าวสารพันธุ์ชัยนาทที่สลายตัวในสารละลายเบส
 (a) em 28% + 90°C (b) em 28% + 110°C (c) em 33% + 90°C
 (d) ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (em : extrusion moisture)

ตารางที่ 4.6 ระดับการเกิดเจลลาคีโนเซชัน (Degree of gelatinization, DG) ของแป้งข้าวขึ้นรูป

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°C)	DG (%)
28	90	38 ^d
28	110	48 ^c
33	90	54 ^b
33	110	65 ^a
native rice flour		16 ^c

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

แป้งสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้นทำให้ WAI สูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษานี้สัมพันธ์กับการทดลองของ Dileep, Shamasundar, Binsi and Howell (2009), Abdel- Aal et al. (1992), Rolfe et al. (2001) และ Sacchetti, Pinnavaia, Guidolin and Dalla (2004) ที่พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีค่า WAI ต่ำ เกิดจากผลของอุณหภูมิในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่ำ และสอดคล้องกับผลการทดลองของรัตนาวดี ปัตถะเมฆอรพรรณ อนันคำ และ ศรีสุวรรณ นฤนาทวงศ์สกุล (ม.ป.ป.) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตข้าวขึ้นรูปจากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่า WAI ของข้าวขึ้นรูปมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นในปลายข้าวบดเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhuang et al. (2009) ที่ทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวอินดิกา พบว่าเมื่ออุณหภูมิบารเรลสูงขึ้น WAI จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนผลที่มีต่อ WSI พบว่าเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการแตกหักได้มากขึ้นเนื่องจากได้รับทั้งความร้อนและแรงเฉือน ดังนั้นเมื่อมีปริมาณเม็ดแป้งที่แตกหักมากกว่าจึงทำให้การละลายของแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Lopes, Batista, Fernandes และ Santiago (2012) ที่ทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงหน้าที่ ชีวเคมี และคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดแป้งถั่วพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น WSI จะมีค่ามากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นพบว่าไม่มีผลต่อค่า WSI

คุณสมบัติของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านความหนืดมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้ WAI และ WSI มีค่าเพิ่มขึ้น (Kadan, Bryant and Pepperman, 2003; Hagenimana, Ding and Fang, 2006; Bryant, Kadan, Champagne, Vinyard and Boykin, 2001) ทั้ง WAI และ WSI เป็นตัวแปรสำคัญในการทำนายพฤติกรรมของวัตถุดิบในกระบวนการผลิต (Lopes et al., 2012) โดยค่า WAI ยังสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันได้ (DG) (Zhuang et al., 2009) แป้งดิบโดยทั่วไปจะไม่สามารถละลายในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชัน แต่เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจากบรรยากาศได้จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการแบบผันกลับได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ส่วนค่า WSI มีความสัมพันธ์กับระดับการแตกของโมเลกุล (degree of molecular damage) (Bryant et al., 2001) และขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ละลายน้ำได้ซึ่งอาจจะมากขึ้นเนื่องจากการสลายของแป้งและส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต (Guha et al., 1997) กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเฉือน ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชถูกทำลายด้วยแรงกล

แรงเฉือนและความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างหรือ โมเลกุลของสตาร์ชในบางส่วนเกิดการเปิดออก และหลุดออกจากเม็ดแป้ง มีผลให้โมเลกุลสตาร์ชขนาดเล็กสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น และสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าโมเลกุลสตาร์ชขนาดใหญ่ เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ช ที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าโมเลกุลของสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น การที่สตาร์ชถูก ทำลายทำให้มีระดับการแตกของโมเลกุลมากขึ้นทำให้ของแข็งที่ละลายได้นั้นหลุดออกมาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งดิบที่ไม่ผ่านการแปรรูป

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI) และค่าดัชนีการละลาย (Water Solubility Index, WSI) ของแป้งข้าวขึ้นรูป

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°C)	WAI (g/g)	WSI (%)
28	90	3.36 ^c	5.62 ^b
28	110	4.57 ^c	6.02 ^b
33	90	7.42 ^b	7.10 ^a
33	110	17.41 ^a	6.09 ^b
native rice flour		1.83 ^d	2.89 ^c

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป

4.5.1 คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

ในการหุงต้มข้าวสารให้เป็นข้าวสุกที่สวยและสุกพอดีนั้น ต้องมีระยะเวลา และปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงที่พอดีและเหมาะสมกับปริมาณข้าวสาร การหุงข้าวนานเกินไปทำให้ เมล็ดแตก และอาจไหม้การใส่น้ำน้อยหรือมากเกินไปจะทำให้ข้าวไม่สุก หรือข้าวแฉะ ทำการ ทดสอบคุณภาพการหุงต้ม โดยทำการศึกษาระยะเวลาการหุงต้ม (minimum cooking time) และ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการ หุงต้ม (% water intake) แสดงในตารางที่ 4.8พบว่า ข้าวขึ้นรูปที่ผ่าน กระบวนการเอกซ์ทรูชันจะมีระยะเวลาที่ใช้ในการหุงต้มสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารปกติทั้งนี้ เนื่องมาจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการทางความร้อนรูปแบบหนึ่ง ข้าวขึ้นรูปที่ผลิต โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วทำให้ข้าวขึ้นรูปเกิดการเจลาตา ดิในเซชันบางส่วน ซึ่ง Cheyne et al. (2005); Guha et al. (1998) และ Chinnaswamy and Hanna. (1988) รายงานว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะสามารถละลายและกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น หรือที่อุณหภูมิห้อง และมีความสามารถในการดูดซับน้ำ (hydrate) ได้เร็วกว่าแป้งดิบตามธรรมชาติ ทำให้ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้ใช้เวลาในการหุงต้มสั้นลงในขณะที่ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารปกติ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มของข้าวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนแปลงไปจากการศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) จะสังเกตเห็นว่าข้าวขึ้นรูปสูญเสียลักษณะของเม็ดสตาร์ช มีลักษณะเป็นแป้งหลอมตัวอัดกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 4.3) ซึ่งลักษณะที่ปรากฏดังนี้ จะทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในเมล็ดได้ยากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดข้าวสารปกติ ต้องใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้นจึงจะทำให้ข้าวขึ้นรูปสุกพอดี สัมพันธ์กับผลของค่า WAI (ตารางที่ 4.4) ที่พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่า WAI สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวขึ้นรูปสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าข้าวสารปกติ จึงทำให้อัตราปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (% water intake) ข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาทนอกจากนั้นเมื่อความชื้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการหุงต้มและปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มมีค่าเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับผลระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น (ตารางที่ 4.6) ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบารเลให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 4.8 ระยะเวลาการหุงต้ม ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม ของข้าวขึ้นรูป

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°C)	Minimum cooking	% water intake
		time (min)	
28	90	13 ^c	169.32 ^c
28	110	13 ^c	176.12 ^b
33	90	17 ^b	185.17 ^a
33	110	-	-
Chainat rice grain		21 ^a	156.40 ^d

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่ศึกษา คือความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะ แสดงในตารางที่ 4.9 โดยพบว่าค่าความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะของข้าวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท ทั้งนี้ความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดข้าวขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการหุงต้ม เกิดจากการที่ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวขึ้นรูปสูญเสียโครงสร้างของเมล็ดที่มีตามธรรมชาติทำให้เมื่อทำการหุงต้ม ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวขึ้นรูปมีการละลายออกมาในน้ำที่ใช้ในการหุงต้มจึงทำให้ผิวของเมล็ดข้าวขึ้นรูปมีความเหนียว ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับค่า WAI (ตารางที่ 4.7) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมล็ดข้าวขึ้นรูป เป็นเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมาแล้วส่วนหนึ่ง เกิดการเจลลาติไนเซชันแล้ว ข้าวขึ้นรูปมีลักษณะของเมล็ดข้าวที่เป็นเจลสตาร์ช

ที่ละลายน้ำได้ง่าย เมื่อผ่านกระบวนการหุงต้มจึงทำให้ผิวหนังนอกของเมล็ด ที่มีลักษณะเป็น เจลสตาร์ชนี้ละลายออกมามากกับน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม ข้าวขึ้นรูปจึงมีความเหนียวมากกว่าข้าวสารปกติ ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการดูดซับน้ำที่วิเคราะห์ได้ (ตารางที่ 4.7) ทำให้เมล็ดข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่ได้มีความเหนียวมากกว่าเมล็ดข้าวสารปกติหุงสุกส่วนแรงกดอัดภายในภาชนะที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนแปลงไป โดยแป้งข้าวจะถูกทำให้ร้อน สุก และนวด ให้มีลักษณะเป็น โด (dough) ที่มีลักษณะคล้ายพลาสติกหยุ่นเหนียวภายในบารเรล แล้วอัดผ่านรูเปิดโดยใช้หน้าแปลนซึ่งได้รับการออกแบบมาให้มีรูปร่างเป็นเมล็ดข้าวออกมา และข้าวขึ้นรูปมีโครงสร้างภายในเป็นเนื้อเดียวกันที่อัดแน่นดังผลการศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) (รูปที่ 4.3) จึงทำให้ข้าวขึ้นรูปมีแรงกดอัดภายในภาชนะมากกว่าข้าวสารปกติ

การเพิ่มปริมาณความชื้นวัตถุดิบทำให้ค่าความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะมีค่าเพิ่มขึ้น ($p > 0.05$) สัมพันธ์กับระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน (ตารางที่ 4.6) ความชื้นของวัตถุดิบที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน ดัชนีการดูดซับน้ำ และดัชนีการละลายน้ำสูงขึ้น ทำให้ค่าความเหนียวสูงขึ้นนอกจากนี้เมื่อปริมาณความชื้นของวัตถุดิบมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของแป้งข้าวซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในบารเรลดลง ทำให้ความต้านทานการหมุนของสกรูในบารเรลดต่ำ ค่าทอร์คจึงต่ำลงเจลงแป้งข้าวขึ้นรูปที่ออกสู่หน้าแปลนรูปเมล็ดข้าวจึงมีความแน่นมากขึ้น ส่งผลให้แรงกดอัดภายในภาชนะมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับผลการทดลองของรัตนาวดี ปัตตะเมฆ และคณะ (ม.ป.ป.) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตข้าวขึ้นรูปจากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่าความแน่นเนื้อของข้าวขึ้นรูปหุงสุกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับผลการทดลองของ Zhuang et al. (2009) ที่ทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวขึ้นรูปอินดิคาพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ความแข็งของเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบารเรลให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ

4.6 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวขึ้นรูป

ลักษณะทางโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณารูปแบบผลึกของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทและแป้งข้าวขึ้นรูปจากการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค Wide Angle x-ray Scattering (WAXS) พบว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทปรากฏพีก คู่ (doublet peak) ที่ 2θ ที่ 17 และ 18°

และพีคเดี่ยว (singlet peak) ที่ 2θ ที่ 15 และ 23° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกชนิด A และเป็นลักษณะผลึกที่พบได้ทั่วไปในแป้งจากธัญชาติ (Cheetham and Tao, 1998)

ตารางที่ 4.9 ค่าความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

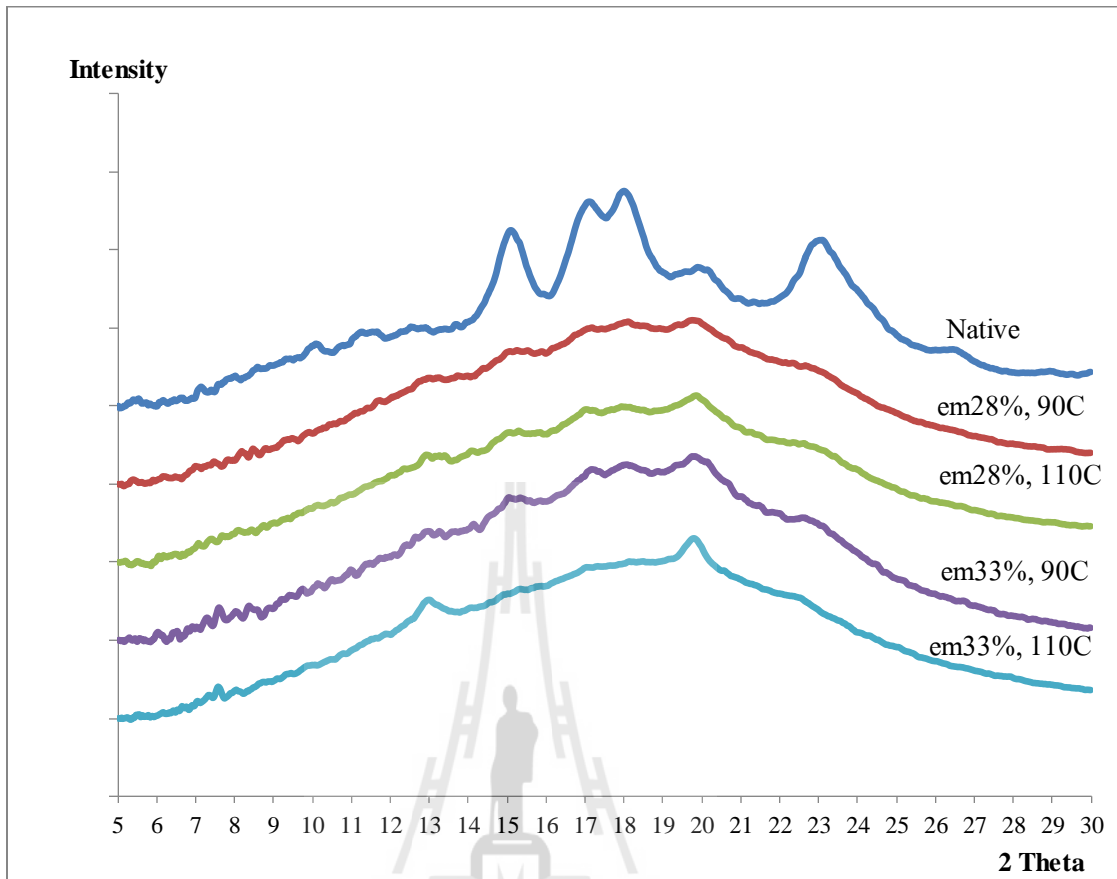
Extrusion moisture (%)	Barrel temperature ($^\circ\text{C}$)	Back extrusion force (g)	Stickiness (g)
28	90	3,933 ^c	12.95 ^c
28	110	5,676 ^b	23.95 ^b
33	90	7,056 ^a	42.60 ^a
33	110	-	-
Chainat rice grain		2,641 ^d	7.40 ^d

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ขณะที่แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะการผลิต em 28% + 90°C , em 28% + 110°C และ ที่สภาวะการผลิต em 33% + 90°C ปรากฏ singlet peak ที่ 2θ ที่ 15 และ 23° ปรากฏ doublet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 17° และ 18° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A นอกจากนี้ยังเห็นลักษณะของ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 13, 19.7° ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) (Derycke et al., 2005) เนื่องจากแป้งข้าวพันธุ์ชัชนาทที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ 0.65% ดังนั้นจึงสามารถรวมตัวกับอะมิโลส เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวได้ในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่สภาวะการผลิต em 33% + 110°C ปรากฏ singlet peak ที่ 2θ ที่ 13 และ 19.7° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ V ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ เอกซ์ทรูชันมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกจาก A เป็น A+V และ V

ตารางที่ 4.10 รูปแบบผลึก (Crystal pattern) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัชนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature ($^\circ\text{C}$)	Crystal pattern
28	90	A + V
28	110	A + V
33	90	A + V
33	110	V
native rice flour		A



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูปด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Wide Angle X-ray Scattering) (WAXS)

4.7 คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป

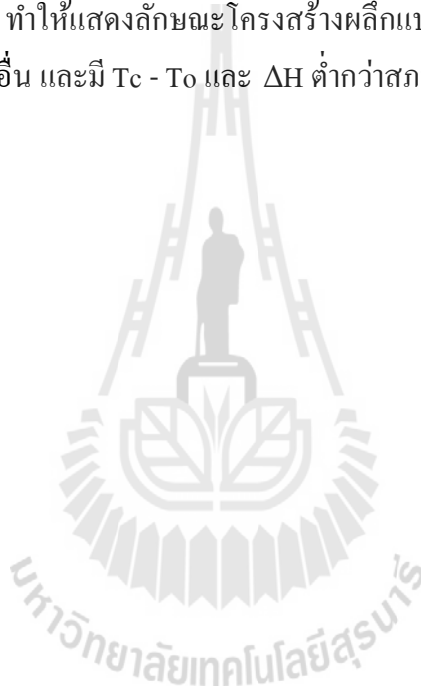
คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทสามารถศึกษาได้ด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาคติในเซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาคติในเซชันของแป้งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาคติในเซชัน หรือค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสคือค่าเอนทัลปี (ΔH) (Zobel et al., 1988) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาคติในเซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายใน โมเลกุลของแป้งได้ แป้งที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมาก มีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาคติในเซชันมากเนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการพอง สลายพันธะไฮโดรเจน ทำให้แป้งเกิดการเจลลาคติในเซชันนอกจากนี้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset

temperature, T_o) ค่าอุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak temperature, T_p) และค่าอุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c) ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความแตกต่างของขนาด รูปแบบ และการกระจายตัวของสตาร์ชแกรนูล ค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) ขึ้นกับปัจจัยหลายปัจจัย เช่น รูปร่างของสตาร์ชแกรนูล สัดส่วนของขนาดแกรนูล (Kaur and Singh, 2000; Addo, Xiong and Blanchard, 2001)

ผลการวิเคราะห์ T_o , T_p , T_c , ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ($T_c - T_o$) และ ΔH ของแป้งข้าวพันธุชยันนาทและแป้งข้าวขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่าแป้งข้าวพันธุชยันนาท เกิดพิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนขึ้นในช่วง T_o ถึง T_c ที่ช่วงอุณหภูมิ 67.82 -89.77°C ซึ่งแสดงถึงช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งโดยจะมี $T_c - T_o$ ที่กว้างกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป (21.95°C) และมี ΔH สูงกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป (8.10 J/g) เนื่องจากโครงสร้างของแป้งข้าวพันธุชยันนาทมีโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกมากกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป แป้งจึงต้องใช้ปริมาณความร้อนมากกว่าเพื่อทำการสลายพันธะไฮโดรเจน และทำให้แป้งเกิดการเจลลาติไนเซชันแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่า T_o , T_c และ T_p สูงกว่าแป้งข้าวพันธุชยันนาท เนื่องมาจากแป้งข้าวขึ้นรูปเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complexes) ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V และแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยโครงสร้างผลึกที่ยังหลงเหลืออยู่นี้อาจเกิดการเหนียวทำให้เกิดผลึกขึ้นมาใหม่ ข้าวขึ้นรูปจึงมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A + V และแบบ V จึงทำให้ค่า T_o , T_c และ T_p ของข้าวขึ้นรูปสูงกว่าข้าวพันธุชยันนาทเมื่อพิจารณาจากค่า ΔH ของแป้งข้าวขึ้นรูปพบว่ามีค่าต่ำทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลึกที่เกิดขึ้นในข้าวขึ้นรูปมีปริมาณเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ค่า $T_c - T_o$ ของแป้งข้าวขึ้นรูปก็แคบกว่าแป้งข้าวพันธุชยันนาท ซึ่งค่า $T_c - T_o$ ที่แคบกว่านี้แสดงให้เห็นว่าขนาดของผลึกมีความใกล้เคียงกัน ผลึกมีความ homogeneity สูงแต่ความเป็นผลึกต่ำจึงทำให้ค่า ΔH ของแป้งข้าวขึ้นรูปต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุชยันนาท

แป้งข้าวขึ้นรูปสภาวะการผลิตที่ 1 -3 มี T_o , T_p และ T_c ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติสภาวะการผลิตที่ 1 -3 เกิดพิคของการเปลี่ยนแปลงความร้อนซึ่งเป็นพิคของโครงสร้างผลึกแบบ A รวมกับพิคของโครงสร้างผลึกแบบ V ส่วนที่สภาวะการผลิตที่ 4 (em33% + 110°C) เกิดพิคของการเปลี่ยนแปลงความร้อนซึ่งเป็นพิคของโครงสร้างผลึกแบบ V โดยพิคของโครงสร้างผลึกแบบ V เป็นพิคที่แสดงว่าเกิดการหลอมของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complexes) (Lamberts et al., 2009; Marti, Seetharaman and Pegina, 2010; Marti, Ambrogina and Seetharaman, 2011) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชและไขมันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชภายในบารเรลโดยอะมิโลสที่มีอยู่ในแป้งมีความสามารถในการจับกับไขมัน

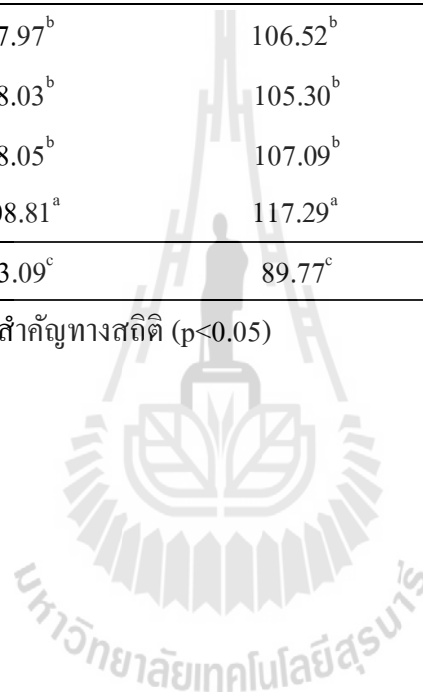
หรือกรดไขมัน และรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเกิดขึ้น (Bhatnagar and Hanna., 1994; Cheyne et al., 2005) สัมพันธ์กับผลการทดลองของ Marti et al. (2010) ซึ่งทำการศึกษาเปรียบเทียบการทำพาสต้าแป้งข้าวเจ้าแบบธรรมดาและด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าในการผลิตพาสต้าแป้งข้าวเจ้าโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะพบฟิสิกของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันที่อุณหภูมิการหลอมเหลวสูงกว่า 100°C ซึ่งฟิสิกที่ปรากฏนี้แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงตัวกันใหม่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันและสายโซ่สตาร์ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกในแป้งและทำให้มีความคงทนต่อความร้อนเนื่องจากแป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะการผลิต $em33\% + 110^{\circ}\text{C}$ นี้มีค่า DG สูงที่สุด มีผลึกแบบ A เหลือน้อยมาก หรือไม่เหลือเลย ทำให้แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V แบบเดียวซึ่งมีค่า T_o , T_p และ T_c สูงกว่าสภาวะการผลิตอื่น และมี $T_c - T_o$ และ ΔH ต่ำกว่าสภาวะการผลิตอื่น



ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC)

สถานะการทดลอง	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	Tc-To (°C)	ΔH (J/g)
28% mc + 90°C	89.65 ^b	97.97 ^b	106.52 ^b	16.87 ^{cd}	0.76 ^b
28% mc + 110°C	90.04 ^b	98.03 ^b	105.30 ^b	15.26 ^c	0.71 ^b
33% mc + 90°C	89.97 ^b	98.05 ^b	107.09 ^b	17.12 ^{bc}	0.78 ^b
33% mc + 110°C	103.59 ^a	108.81 ^a	117.29 ^a	13.70 ^d	0.53 ^b
Native flour	67.82 ^c	73.09 ^c	89.77 ^c	21.95 ^a	8.10 ^a

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)





บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการแปรรูปข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีลักษณะปรากฏที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท สภาพการผลิตที่มีความเหมาะสมที่สุดในการผลิตข้าวขึ้นรูป คือ สภาพการผลิตที่ $em\ 28\% + 90^{\circ}C$ เนื่องจากเป็นสภาพการผลิตที่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะปรากฏที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมากที่สุด และความหนืดของแป้งข้าวขณะออกจากบารेलมีความเหมาะสม ทำให้เมื่อทำการตัดด้วยใบมีดตัดแล้วได้เมล็ดข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะปรากฏเหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมากที่สุด ส่วนสภาพการผลิตที่ $em\ 33\% + 110^{\circ}C$ ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีความหนืดน้อยเกินไป ไม่สามารถตัดด้วยใบมีดตัดเพื่อผลิตให้มีลักษณะเป็นเมล็ดข้าวสารได้

ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพแตกต่างจากข้าวสารพันธุ์ชัยนาทปกติ โดยข้าวขึ้นรูปเกิดเจลลาคติในเซชันบางส่วน ทำให้แป้งข้าวขึ้นรูปมีระดับการเกิดเจลลาคติในเซชัน (DG) ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) และ ดัชนีการละลายน้ำ (WSI) สูงกว่าแป้งข้าวสารพันธุ์ชัยนาท ทำให้ข้าวขึ้นรูปใช้ระยะเวลาในการหุงต้มสั้นลง แต่ใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า WAI ข้าวขึ้นรูปมีความเหนียวและความแน่นเนื้อมากกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท สัมพันธ์กับค่า WSI ข้าวขึ้นรูปสูญเสียโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยม แต่มีลักษณะเป็นเจลแป้งอัดแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้น้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ยากขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้น และทำให้ความแน่นเนื้อของข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท ซึ่งสอดคล้องกับความแกร่งของเมล็ดข้าวขึ้นรูป (integrity) ที่มีค่าการสลายตัวในสารละลายเบสที่ระดับสูงกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาทกระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้บางส่วนของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนรูป (transform) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V แต่ก็ยังเหลือลักษณะผลึกแบบ A อยู่บ้าง จึงแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A+V แต่สภาพการผลิตที่ $em\ 33\% + 110^{\circ}C$ แป้งข้าวขึ้นรูปแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V (amylose-lipid complex) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทางความร้อนเนื่องจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของผลึกในแป้งส่งผลให้มีความคงทนต่อความร้อน จึงทำให้มีค่า T_o , T_p และ T_c สูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าแป้งข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A+V สัมพันธ์กับผลของ DG และ WAI ที่มีค่ามากที่สุด แป้งที่มี DG สูงที่สุดสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมันได้ง่ายที่สุด ดูดซับน้ำได้ดีที่สุด

รายการอ้างอิง

- กมลวรรณ แจ่มชัด. (2541). การแปรรูปอาหาร โดยวิธีเอกซตรูชัน. *อุตสาหกรรมเกษตร*. 9 (2): 4-8.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 292 หน้า.
- ข้าว. (2547). [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.ku.ac.th/e-magazine/february47/agri/rice.html>
- ชนิดา หันสวาสดี พิระศักดิ์ ฉายประสาท และปณทริกา รัตนศรีวงศ์. (2548). *การแปรรูปผลิตภัณฑ์ข้าวพองกรอบ*. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ชาญ มงคล. (2536). *ข้าว. ตำราเอกสารวิชาการฉบับที่ 63*. ภาพพัฒนาตำราและเอกสารวิชาการ หน่วยการศึกษานิเทศ. กรมวิชาการฝึกหัดครู. กรุงเทพมหานคร. 43 หน้า.
- ประชา บุญญศิริกุล. (2537). *บทบาทของเอกซตรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย*. *อาหาร*. 26: 235-248.
- รัตนาวดี ปัตถะเมฆ อรวรรณ อนันคำ และ ศรีสุวรรณ นฤนาทวงศ์สกุล. (ม.ป.ป.). *การผลิตข้าวขึ้นรูปจากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซตรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว*. ภาควิชาวิศวกรรมอาหารคณะอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- วิไล รังสาดทอง. (2547). *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555). *สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2555* [ออนไลน์]. ได้จาก:<http://www.oae.go.th/download/journal/trends2555.pdf>
- สมาคมโรงสีข้าวไทย. (2555). *ราคาข้าว* [ออนไลน์] ได้จาก:[http://www.thairicemillers.com /index.php?option=com_content&task=category§ionid=8&id=21&Itemid=53](http://www.thairicemillers.com/index.php?option=com_content&task=category§ionid=8&id=21&Itemid=53)
- สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. (2552). *ประวัติศาสตร์ข้าวโลก* [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.riceexporters.or.th/rice_profile.htm
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). *ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- Abdel-aal, E.S.M., Sosulski, F.W., Adel, A., Shehata, Y., Youssef, M.M. and Ihave, J.L. (1992). Effect of extrusion cooking on the physical and functional properties of wheat, rice and fababean blend. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 25: 21–25.
- Addo, K., Xiong, Y.L. and Blanchard, S.P. (2001). Thermal and dynamic rheological properties of wheat flour fractions. **Food Research Int.** 34: 329-335.
- Akdogan, H. (1996). Pressure, torque and energy responses of a twin screw extruder at high moisture contents. **J. Food Sci. Tech.** 29: 423-429.
- Artz, W.E., Warren, C.C. and Villota, R. (1990). Twin screw extrusion modification of corn fiber and corn starch extruded blend. **J. Food Sci.** 55: 746–750, 754.
- AOAC. (1997). **Official Method of Analysis**. 16th ed. Association of Official Analytical chemists, Washington, D.C.
- Bhatnagar, S. and Hanna, M.A. (1994). Amylose-Lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. **Cereal Chem.** 71(6): 582-587.
- Bhattacharya, S. and Hanna, M.A. (1987). Textural properties of extrusion-cooked corn starch. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 20(4): 195.
- Biliaderis, C.G., Page, C.M., Maurice, T.J. and Juliano, B.O. (1986). Thermal characterization of rice starches: A polymeric approach to phase transitions of granular starch. **J. Agri. Food Chem.** 34: 6-14.
- Bryant, R.J., Kadan, R.S., Champagne, E.T., Vinyard, B.T. and Boykin, D. (2001). Functional and digestive characteristics of extruded rice flour. **Cereal Chem.** 78(2): 131-137.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. (1998). Starch granules: structure and biosynthesis. **Inter. J. Biol. Macro.** 23: 85-112.
- Chang, Y.K. (2003). Effects of acid concentration and extrusion variables on some physical characteristics and energy requirements of cassava starch. **J. Chem. Eng.**
- Chaiyakul, S., Jangchud, K., Jangchud, A., Wuttijumnong, P. and Winger, R. (2009). Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack. **J. Food Sci. Tech.** 42: 781-787
- Cheetham, N.W.H. and Tao, L. (1998). Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. **Carbohydr Polym.** 36: 277-284.

- Cheyne, A., Barnes, J., Gedney, S. and Wilson, D.I. (2005). Extrusion behaviour of cohesive potato starch pastes: II. Microstructure–process interactions. **J. Food Eng.** 66: 13-24
- Chaing, B. Y. and Johnson, J. A. (1977). Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-toluidine reagent. **Cereal Chem.** 54(3): 429-435.
- Chinnaswamy, R. and Hanna, M.A. (1988). Relationship between amylase content and extrusion-expansion properties of corn starch. **Cereal Chem.** 65(2): 138-143
- Chuang, G.C.C. and Yeh, A.I. (2004). Effect of screw profile on residence time distribution and starch gelatinization of rice flour during single screw extrusion cooking. **J. Food Eng.** 63: 21-31
- Chung, H., Liu, Q., Pauls, K.P., Fan, M.Z. and Yada, R. (2008). In vitro starch digestibility, expected glycemic index and some physicochemical properties of starch and flour common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in Canada. **Food Research Int.** 41: 869–875.
- CN102396664A. (2010). **Preparation method of instant rice with recombinant rice as raw Material.**
- CN102578475A. (2012). **A nutrition enhancing coarse grain rice, and its production method.**
- CN102599433A. (2012). **A method for the production of coarse grain artificial m.**
- CN1115107C.(2001). **Process for manufacturing natural nutritive black rice extract.**
- Dautant, F.J., Simancas, K., Sandoval, A.J. and Muller, A.J. (2007). Effect of temperature, moisture and lipid content on the rheological properties of rice flour. **J. Food Eng.** 78: 1159-1166.
- Dexter, J.E., Dronzek, B.L., and Matsuo, R.R. (1978). Scanning electron microscopy of cooked spaghetti. **Cereal Chem.** 55: 23-30.
- Derycke, V., Vandeputte, G.E., Vermeulen, R., De Man, W., Goderis, B., Koch, M.H.J. and Delcour, J.A. (2005). Starch gelatinization and amylose-lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. **J. Cereal Sci.** 42(3): 334-343.
- Dileep, A.O., Shamasundar, B.A., Binsi, P.K. and Howell, N.K. (2009). **Composition and quality of rice flour-fish mince based extruded products with emphasis on thermal**

properties of rice flour. India: Karnataka Veterinary, Animal and Fisheries Sciences University

- Ding, Q.B., Ainsworth, P., Tucker, G. and Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. **J. Food Eng.** 66: 283-289
- Doublier, J.L., Colona, P. and Mercier, C. (1986). Extrusion of cooking and drum drying of wheat starch. II Rheological characterization starch pastes. **Cereal Chem.** 63: 240-246.
- E-Dash, A.A., Gonzales, R., Ciol, M., (1983). Response surface methodology in the control of thermoplastic extrusion of starch. **J. Food Eng.** 2: 129-152.
- Guha, M., Ali, S.Z. and Bhattacharya, S. (1997). Twin-screw extrusion of rice flour without a die : effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. **J. Food Sci. Tech.** 33: 251-267
- Guha, M., Ali, S.Z. and Bhattacharya, S. (1998). Effect of barrel temperature and screw speed on rapid visco analyser pasting behavior of rice extrudate. **J. Food Sci. Tech.** 33: 259-266
- Hagenimana, A., Ding, X. and Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. **J. Cereal Sci.** 43: 38-46.
- Harper, J.M. (1981). **Biotechnology and Food process engineering.** Institute of Food Technologists, International Union of Food Science and Technology
- Hizukuri, S. (1996). Starch: analytical aspects. In A.-C.Eliasson (ed.). **Carbohydrates in Food.** 347-429. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Jacobs, H., and Delcour, J.A. (1998). Hydrothermal Modification of Granular Starch, with Retention of the Granular Structure : A Review. **J. Agri. Food Chem.** 46 : 2895-2905.
- JP2011211929A. (2010). **Food composition containing defatted rice bran powder.**
- JP2012120537A. (2012). **Rice-based food composition and method for the preparation.**
- JP2012139158A. (2010). **Rice-like food product and production method thereof.**
- JP4953452B2. (2007). **Artificial rice and its manufacturing method.**
- JP5013874B2. (2004). **A base and a food and method for preparing the same.**
- Juliano, O.B. (1971). A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Science Today.** 16: 334-340, 360.
- Kadan, R.S., Bryant, R.J. and Pepperman, A.B. (2003). Functional properties of extruded rice

- flours. **J. Food Sci.** 68(5): 1669-1672.
- Kaur, K. and Singh, N. (2000). Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour. **J. Food Chem.** 71, 511-517.
- Keshani, D. (2011). **Artificial rice and a method of manufacturing the same using industrial process.** US20120201925A1.
- KR101171258B1. (2010). **A method for manufacturing an artificial rice lowering a blood glucose level.**
- KR1020020026765A. (2000). **Process for reformed rice using grain and functional food materials.**
- KR1020120008735A. (2010). **The manufacture method of imitation rice using medicinal plates.**
- KR1020120008734A. (2010). **The manufacture method of imitation rice using seaweeds and cereal powder.**
- Leelayuthsoontorn, P. and Thipayarat, A. (1996). Textural and morphological changes of jasmine rice under various elevated cooking conditions. **J. Food Chem.** 96: 606-613
- Lopes, L.C.M., Batista, K.A., Fernandes, K.F. and Santiago, R.A.C. (2012). Functional, biochemical and pasting properties of extruded bean (*Phaseolus vulgaris*) cotyledons. **J. Food Sci. Tech.** 47: 1859-1865.
- Marti, A. Seetharaman, K. and Pagina, M.A. (2010). Rice-based pasta: A comparison between conventional pasta-making and extrusion-cooking. **J. Cereal Sci.** 52: 404-409.
- Marti, A., Ambrogina, M. and Seetharaman, K. (2011). Understanding starch organization in gluten-free pasta from rice flour. **Carbohydr Polym.** 84: 1069-1074.
- Matsuo, T., Futsuhara, Y., Kikuchi, F. and Yamaguchi, H. (1997). **Science of the Rice Plant.** 3: 496. Nosan Gyoson Banka Kyokai (Nobunkyo). Tokyo.
- Rolfe, J.B., Ranjit, S.K., Elaine, T.C., Bryan, T.V. and Debbie, B. (2001). Functional and digestive characteristics of extruded rice flour. **Cereal Chem.** 78: 131-137.
- Roos, Y. H. (1995). **Phase transitions in foods.** Academic press, Inc. United Kingdom.
- Sacchetti, G., Pinnavaia, G. G., Guidolin, E. and Dalla, R. M., (2004). Effects of extrusion temperature and feed composition on the functional, physical and sensory properties of chestnut and rice flour-based snack-like products, **J. Food Sci. Tech.** 37: 527-534.

- Singh, B., Sekhon, K.S. and Singh, N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of peagrits on extrusion behaviour and product characteristics of rice. **J. Food Chem.** 100: 198-202
- Sodhi, N.S., Singh, N., Arora, M. and Singh, J. (2003). Changes in physico-chemical, thermal, cooking and textural properties of rice during aging. **J. Food Proc. Preserv.** 27: 387-400.
- Steffe, J. F. (1996). **Rheological methods in food process engineering (2nd ed)**. USA: Freeman Press East Lansing, MI.
- Wang, C., Shen, L. and Wang, S. (1997). **Forming and extruding mould for instant rice**.
- Wani, A.A., Singh, P., Shah, M.A., Schweiggert-Weisz, U., Gul, K. and Wani, I.A. (2012). Rice Starch Diversity : Effects on Structural, Morphological, Thermal and Physicochemical Properties – A Review. **Comprehensive reviews in food science and food safety**. 11: 1541-4337
- Xie, F., Yu, L., Su, B., Liu, P., Wang, J. Liu, H. and Chen, L. (2009). Rheological properties of starches with different amylose/amylopectin ratios. **J. Cereal Sci.** 49: 371-377.
- Yun, M. (2009). **Instant convenient rice and preparation method thereof**. CN101669602A.
- Zhuang, H., AN, H., Chen, H., Xie, Z., Zhao, J., Xu, X. and Jin, Z. (2009). **Effect of extrusion parameters on physicochemical properties of hybrid indica rice extrudates**. China: Zhengzhou University of Technology
- Zobel, H. F., Young, S. N. and Rocca, L. A. (1988). Starch gelatinization: an X-ray diffraction study. **Cereal Chem.** 65:443-446.



ภาคผนวก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุสืบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
3. อบตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5-6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบกำหนดเวลา นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก
5. กำหนดหาปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบอุ่นแก้วสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบลมร้อน ที่ตั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ห่อให้มีดซิดและใส่ลงใน cellulose thimble คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีให้สารทำละลายมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต
4. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในขวดหาปริมาณไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร
5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่น และเปิดสวิตซ์ให้ความร้อน โดยใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง
6. ตั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักด้วยแก้ว
7. กำหนดปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

3. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อให้มิดชิดใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน
2. ใส่สารผสมคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใสปล่อยให้เย็น
5. จัดอุปกรณ์การกลั่น แล้วเปิดสวิตซ์ไฟ และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น
6. ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุกรดบอริก (ความเข้มข้น 4%) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และน้ำซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด เรียบร้อยแล้ว ไปรองรับของเหลวที่กลั่นได้ โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้
7. กำหนดให้เครื่องเติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนัก และทำการกลั่นที่ประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
8. ไตรเตทสารละลายที่กลั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. ทำเบลนค์และปฏิบัติตามข้อ 1-8 โดยไม่เติมตัวอย่าง
10. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \frac{(A-B)N \times 1.4 \times F}{W}$$

เมื่อ A = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตเตรตกับblank (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)

F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25

W = น้ำหนักตัวอย่างที่เริ่มต้น (กรัม)

