

ข่าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทราชั้น

นางสาวสุนทรี เจริญพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

REFORMED RICE USING EXTRUSION

Suntaree Charoenporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Science in Food Technology

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

ข่าวจึ้รูปโดยกระบวนการเอกซ์ทุรชัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุนันทา ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริ โยธิน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจ้านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(ผศ. ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)

คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

สุนทรี เจริญพร : ข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (REFORMED RICE USING EXTRUSION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทา ทองทา, 66 หน้า.

การศึกษาการแปรรูปข้าวขึ้นรูปจากแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท (อะมิโลส 32.9%) ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่หมุนตามกัน ใช้น้ำแปรรูปเมล็ดข้าว โดยใช้ความชื้นของการเอกซ์ทรูชัน (em) 28 และ 33% อุณหภูมิบารเรล 90 และ 110°C อัตราการป้อนวัตถุดิบ 0.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาที ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีระยะเวลาการหุงต้มน้อยลง 4–8 นาที ใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้น 13–29% มีความเหนียว และแรงกดอัดภายในภาชนะมากกว่าข้าวสารปกติ มีระดับการสลายตัวในสารละลายเบสสูงที่สุดที่ระดับ 7 และสูงกว่าข้าวสารปกติที่ระดับ 6 เมื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าข้าวขึ้นรูปสูญเสียโครงสร้างที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมของเม็ดแป้ง ภาพตัดขวางของข้าวขึ้นรูปมีลักษณะเป็นมวลเนื้อเดียวกันแน่น แป้งข้าวขึ้นรูปมีระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน 22–49% ดัชนีการอุ้มน้ำ 1.53–15.58 g/g และดัชนีการละลายน้ำ 2.73–4.21% สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท เมื่อความชื้นของการเอกซ์ทรูชันและอุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มความชื้นของการเอกซ์ทรูชันทำให้ดัชนีการอุ้มน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ ระยะเวลาการหุงต้ม ปริมาณน้ำในการหุงต้ม 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) สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะ em33% + 110°C มีค่า To, Tc และ Tp สูงที่สุด คือ 104, 109 และ 117°C ตามลำดับการศึกษาความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่า peak viscosity (PV), peak time, setback, breakdown และ final viscosity ต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท แป้งข้าวขึ้นรูปเกิดความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25°C (initial paste viscosity, IPV) แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะ em33% + 110°C มี PV และ IPV สูงที่สุด การศึกษาพฤติกรรมการณ์ไหลพบว่าแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท มีพฤติกรรมการณ์ไหลแบบ Shear thinning แป้งข้าวขึ้นรูปมีค่าดัชนีแสดงพฤติกรรมการณ์ไหล (Flow behavior index, n) ต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท โดยที่สภาวะ

em33% + 110°C ทำให้ค่า n ต่ำที่สุด ส่วนสัมประสิทธิ์ความคงตัว (Consistency coefficient) และความหนืดปรากฏที่อัตราเฉือน 100 s^{-1} (Apparent viscosity) สูงที่สุด



สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SUNTAREE CHAROENPORN : REFORMED RICE USING EXTRUSION.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA TONGTA, Ph.D., 66 PP.

REFORMED RICE/EXTRUSION/PHYSICAL PROPERTIES/
PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

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 (T_o), peak temperature (T_p) and conclusion temperature (T_c) than those of native rice flour. The T_o , T_p and T_c of reformed rice flour at em33% +110°C were the highest, being 104, 109 and 117°C, respectively. The pasting properties obtained from the Rapid Visco Analyser (RVA) showed that peak viscosity (PV), peak time, setback, breakdown and final viscosity of the reformed rice flour decreased after extrusion when compared with the native rice flour. The reformed rice flour showed an initial paste viscosity (IPV) at 25°C. The highest PV and IPV were observed from the reformed rice flour of em33% +110°C. The reformed rice flour and native rice flour displayed shear thinning behavior. The flow behavior index (n) of reformed rice flour was lower than that of native rice flour. The processing condition of em33% +110°C led to the lowest n , but the consistency coefficient and the apparent viscosity at shear rate 100 s^{-1} were the highest.

School of Food Technology

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทาทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ความเข้าใจใส่ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในด้านการศึกษาวิจัยและด้านอื่น ๆ ด้วยดียิ่ง ตลอดจนตลอดจนเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขงานและให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน รวมถึงให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริ โยธิน กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณวันชัย จอกระโทก และเจ้าหน้าที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 1, 3 และ 6 ทุกท่าน เจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ที่เสียสละเวลา ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณสุกฤษฎี สุนามะ และเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กันด้วยดีตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณญาติพี่น้องทุกคนในครอบครัว ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพรักทุกท่าน

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณนายสืบสวัสดิ์ เจริญพร และนางดวงใจ เจริญพร ผู้เป็นบิดามารดา ผู้ให้กำเนิด ให้ความรัก ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาเป็นกำลังใจให้จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุนทรี เจริญพร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	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
2.2.3 พฤติกรรมทางความหนืด	12
2.3 การแปรรูปอาหารโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	13
2.3.1 หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์	13
2.3.2 ประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอกซ์ทรูด	14
2.3.3 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 คุณสมบัติทางรีโอโลยี (Rheology).....	17
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ.....	20
3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	20
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว.....	20
3.2.2 การหาปริมาณอะมิโลส.....	21
3.3 การศึกษาสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	21
3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป.....	23
3.4.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป.....	23
3.4.2 การทดสอบคุณภาพการหุงต้ม.....	23
3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส.....	24
3.4.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการสลายตัวในสารละลายเบส.....	25
3.4.5 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด.....	25
3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป.....	25
3.5.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป.....	25
3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน.....	28
3.5.3 คุณสมบัติทางความหนืด.....	28
3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	29
3.7 สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล.....	29
4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	30
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว.....	30
4.2 การศึกษาเบื้องต้นการแปรรูปข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	30
4.2.1 คำจำกัดความของ “ข้าวขึ้นรูป”.....	30
4.2.2 การศึกษาเบื้องต้นการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	30
4.3 ผลของสภาวะการผลิตต่อลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป.....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป (Appearance of reformed rice)	31
4.3.2 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องกราด	35
4.3.3 สมบัติการสลายตัวในสารละลายเบส	36
4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป	38
4.4.1 ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Degree of gelatinization, DG)	38
4.4.2 ดัชนีการดูดซับน้ำและการละลาย	39
4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป	41
4.5.1 คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)	41
4.5.2 คุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	42
4.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวขึ้นรูป	44
4.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป	45
4.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวขึ้นรูป	48
4.8.1 สมบัติการเกิดเพสท์	48
4.8.2 พฤติกรรมการไหล	51
5 สรุปผลการวิจัย	53
รายการอ้างอิง	55
ภาคผนวก	62
ประวัติผู้เขียน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงรูปแบบการจัดเรียงสกรู (จากทางป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)	22
3.2 แสดงการตั้งอุณหภูมิของบาริล	23
3.3 แสดงแผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	23
3.4 ค่าสภาวะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส	24
4.1 แสดงการตั้งอุณหภูมิของบาริล	31
4.2 แผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDML105) และ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 (SPBR 90)	31
4.3 แสดงค่าทอร์ค(%) ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน	32
4.4 ความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูป	35
4.5 แสดงระดับการสลายตัวในสารละลายเบสของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับ ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท	38
4.6 แสดงระดับการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (Degree of gelatinization, DG) ของแป้งข้าวขึ้นรูป	39
4.7 แสดงค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI) และค่าดัชนี การละลาย (Water Solubility Index, WSI) ของแป้งข้าวขึ้นรูป	41
4.8 แสดงระยะเวลาการหุงต้ม (นาที) ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (%) ของข้าวขึ้นรูป	42
4.9 แสดงค่าความแข็ง และความเหนียวของข้าวขึ้นรูป	43
4.10 แสดงรูปแบบผลึก (Crystal pattern) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป	44
4.11 แสดงค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ ชัยนาทด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC)	47
4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางความหนืดของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA (Rapid visco analyzer)	50
4.13 ค่า Flow behavior index (n), Consistency coefficient (k) Pa.sn และ Apparent viscosity (η_{100}) ของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท	52

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
2.9	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer.....	13
2.10	ลักษณะของพฤติกรรมการไหล.....	19
3.1	ลักษณะของเมล็ดข้าวที่ละลายในสารละลายเบส.....	27
4.1	ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90 °C (b) em 28% + 110 °C (c) em 33% + 90 °C (d) ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (em : extrusion moisture).....	33
4.2	แสดงตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้.....	34
4.3	โครงสร้างจุลภาคของข้าวต่างๆที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด ส่องกราด (SEM): ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90 °C (b) em 28% + 110 °C (c) และ em 33% + 90 °C (d).....	36
4.4	แสดงลักษณะของเมล็ดข้าวขึ้นรูปและข้าวสารพันธุ์ชัยนาทที่สลายตัว ในสารละลายเบส.....	37
4.5	ลักษณะทางโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Wide Angle X-ray Scattering) (WAXS).....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงทางความหนืดของแป้งข้าวขึ้นรูป และ
แป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA
(Rapid visco analyzer) (em: extrusion moisture; LT: low temperature;
HT: high temperature).....50



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารประจำวันมากกว่าในภูมิภาคอื่น ๆ (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2552) ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย เป็นอาหารที่มีการบริโภคเป็นหลักของคนไทย และเป็นอาชีพหลักของเกษตรกรแล้ว โดยไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก โดยในปี 2554 ไทยมีส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 30.70 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) อาจกล่าวได้ว่า ข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยมานานตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีประเทศอื่น ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา เวียดนาม อาร์เจนตินา ออสเตรเลีย จีน สหภาพยุโรป และอินเดีย ที่มีความสามารถในการส่งออกเพิ่มขึ้นเป็นลำดับด้วยเช่นกัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ไทยควรมีการพัฒนาปรับปรุงการแปรรูปข้าวสารให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้สูงขึ้น และมีราคาที่ค่อนข้างเสถียรภาพ ไม่ขึ้นลงตามภาวะสินค้าเกษตร และเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับประเทศคู่แข่ง

เมล็ดข้าว ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวหรือผล เรียกว่ากลีบ (hull หรือ husk) และส่วนเนื้อผล หรือผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) ซึ่งในการบริโภคต้องมีการแปรรูปจากข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสาร โดยผ่านกระบวนการพื้นฐาน 4 ขั้นตอน คือ การทำความสะอาด การกะเทาะ การขัดขาว และการคัดแยก การกะเทาะเปลือกหรือกระบวนการสีข้าว ส่วนเปลือกที่หลุดออกมาเรียกว่า กลีบ จากนั้นทำการแยกกลีบ และขัดขาวข้าวกล้องให้เป็นข้าวขาว เมื่อข้าวกล้องผ่านการขัดขาวจนเป็นข้าวสารแล้ว อาจยังมีส่วนของรำติดอยู่ที่ผิวข้าว ดังนั้นจึงต้องทำการขัดมันเพื่อขจัดรำที่ผิวข้าวออกให้หมด ทำให้ผิวข้าวสารมีความเรียบมัน อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการสีข้าวมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเปลือก รำ และคัพพะ (germ หรือ จมูกข้าว) ออกจากเนื้อเมล็ดข้าว ได้เป็นข้าวสารที่มีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดมากที่สุด หรือมีข้าวหักน้อยที่สุด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ซึ่งจากกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เมล็ดข้าวบางส่วนเกิดการแตกหักเสียหาย ขายได้ในราคาต่ำ จึงต้องทำการคัดขนาดข้าวสารเพื่อแยกส่วนต่าง ๆ ของข้าว เป็นข้าวเต็มเมล็ด ดันข้าว ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักเล็ก และปลายข้าว ซึ่งแต่ละส่วนของข้าวมีราคาที่ขายตามท้องตลาดแตกต่างกันตามคุณภาพ เช่น วันที่ 3

ตุลาคม 2555 ข้าวหอมมะลิใหม่ 100% ชั้น 1 มีราคา 3,250 – 3,300 บาท/100 กิโลกรัม ในขณะที่ปลายข้าวหอมมะลิ มีราคา 1,680 – 1,700 บาท/100 กิโลกรัม (สมาคมโรงสีข้าวไทย, www, 2555)

การแปรรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่รวมหลาย ๆ กรรมวิธีเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การต้ม การนวด การเนียน การขึ้นรูป หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์ คือ วัตถุดิบจะถูกส่งไปที่ส่วนรับวัตถุดิบ (feed hopper) จากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเอกซ์ทรูเดอร์ วัตถุดิบจะหลอมเหลวอยู่ในรูปคล้ายพลาสติก เนื่องจากความดันสูง อุณหภูมิสูง และแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นในบารเรล จากนั้นวัตถุดิบจะอยู่ในรูปของโด และเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการหมุนของสกรู ช่วงระยะที่ผ่านสกรูเหล่านี้ โดจะถูกทำให้สุกเนื่องจากเกิดการเจลาติไนเซชัน และทำให้เกิดรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน (die) ซึ่งเป็นรูเปิดหรือช่องอยู่ส่วนสุดท้ายของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เรียกว่า เอกซ์ทรูเดท (extrudate) (กมลวรรณแจ้งชัด, 2541) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ ผลิตภัณฑ์กรอบพองสุกทันที (direct expanded product) เป็นผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันทีเมื่อออกจากหน้าแปลนของเครื่องอัดพอง และไม่ต้องแปรรูปอื่นนอกจากการทำแห้ง เช่น ขนมขบเคี้ยวพองกรอบ ผลิตภัณฑ์อาหารเช้า และผลิตภัณฑ์ซึ่งยังไม่สุกพองทันที (indirect expanded product) หรือเรียกว่าผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (half products หรือ intermediate products) ต้องมีขั้นตอนของกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นมาอีกจึงสามารถรับประทานได้ เช่น การทอด การอบ หรือการต้มสุก ตัวอย่างอาหารในกลุ่มนี้ได้แก่ ข้าวเกรียบ สเปกเก็ตตีพาสต้า เป็นต้น (ประชา บุญญศิริกุล, 2537) ในการผลิตข้าวขึ้นรูป จัดอยู่ในกลุ่มของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป ซึ่งการขึ้นรูปอาหาร (forming) เหล่านี้ต้องอาศัยหน้าแปลนที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ทำให้อาหารที่ผ่านกระบวนการผลิตมีรูปร่างต่าง ๆ ตรงตามต้องการ ในการผลิตข้าวขึ้นรูปก็เช่นเดียวกัน โดยใช้หน้าแปลนที่ออกแบบมาเป็นรูปเมล็ดข้าว ทำให้เมื่อทำการเอกซ์ทรูชันแล้วได้ข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารปกติ ซึ่งการศึกษาของ Cheyne, Barnes, Gedney and Wilson., 2005; Guha, Ali and Bhattacharya., 1998 พบว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะมีความสามารถในการดูดน้ำ (hydrate) ได้เร็วกว่าแป้งตามธรรมชาติ

ข้าวเต็มเมล็ดตามปกติจะจำหน่ายในรูปของข้าวสารและมีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ข้าวเหนียว ข้าวกล้องสำเร็จรูป ข้าวบรรจุกระป๋อง ส่วนข้าวหักและปลายข้าวเนื่องจากมีราคาต่ำ จึงมักถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น เป็นอาหารสัตว์ เป็นต้นและนิยมนำไปแปรรูปต่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ แป้งข้าว (flour) ผลิตภัณฑ์เส้นและแผ่น เช่น ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็ก เส้นหมี่ ขนมจีน แป้งแผ่น ขนมลอดช่อง เป็นต้น ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าวเหล่านี้ได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งหากสามารถทำการพัฒนาข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยใช้ข้าวหักหรือปลายข้าวซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิต

จะสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าวหักและปลายข้าวได้อีกด้วย นอกจากนี้หากมีการพัฒนาเพิ่มเติม โดยให้ข้าวกลุ่มนี้เป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น และสามารถเป็นอาหารเพื่อสุขภาพได้ ซึ่งในปัจจุบันเป็นกลุ่มอาหารที่กำลังได้รับความสนใจอย่างสูงจากประชาคมโลก ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าวหักและปลายข้าวเหล่านี้ได้มากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อผลิตข้าวขึ้นรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวขึ้นรูป ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

กระบวนการเอกซ์ทรูชันสามารถใช้ในการขึ้นรูปข้าวได้เมื่อมีสภาวะการผลิตที่เหมาะสม สภาวะการผลิตที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีความสัมพันธ์กับการขึ้นรูป และคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวขึ้นรูป

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวกับการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ ที่สภาวะการผลิตต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อลักษณะหรือคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวขึ้นรูปโดยใช้ข้าวพันธุ์ชัยนาทเป็นวัตถุดิบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ข้าวขึ้นรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่มีมูลค่าสูงขึ้น

1.5.2 ทราบถึงผลที่เกิดจากตัวแปรต่าง ๆ ที่มีความสำคัญในการผลิตข้าวขึ้นรูปและเป็นประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวต่อไป

1.5.3 ทราบความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพของข้าวขึ้นรูปกับตัวแปรด้านวัตถุดิบ ด้านการแปรรูป และลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพของข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวขึ้นรูปที่ได้ เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจของกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

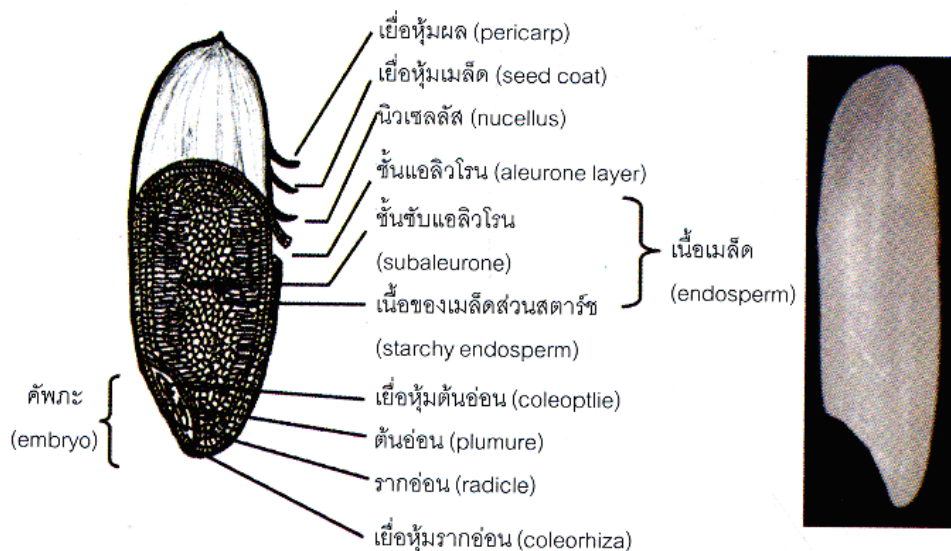
“ข้าว”จัดเป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า (Gramineae) จัดอยู่ในสกุล(genus) ออไรซ่า (Oryza) สกุลนี้ประกอบด้วยชนิด (species) ต่าง ๆ ถึง 25 ชนิดแต่ชนิดที่เพาะปลูกเป็นอาหารมีเพียง 2 ชนิด คือ ข้าวปลูกเอเชีย (*Oryza sativa*Linn.) และ ข้าวปลูกแอฟริกา (*Oryzaglaberrima*Steud.) ซึ่งข้าวที่ค้าขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดเป็นข้าวที่ปลูกจากแถบเอเชีย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

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารประจำวันมากกว่าในภูมิภาคอื่น ๆ สำหรับประเทศไทยแล้ว ข้าวเป็นพืชอาหารประจำชาติที่มีตำนานประวัติศาสตร์ยาวนาน ปรากฏเป็นร่องรอยพร้อมกับอารยธรรมไทยมาไม่น้อยกว่า 5,500 ปี ซึ่งมีหลักฐานจากเครื่องปั้นดินเผา ถ้ำถ่านในดิน และโบราณวัตถุอื่น ๆ (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2552) ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย โดยนอกจากเป็นอาหารที่มีการบริโภคเป็นหลักของคนไทยและเป็นอาชีพหลักของเกษตรกรแล้ว ไทยยังเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก โดยในปี2554 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) ประกบกันโดยแกลบจะถูกกำจัดออกกระหว่างการสีข้าว (ชาญ มงคล, 2536) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยขนหาง (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% ของเมล็ดทั้งหมด) ซึ่งประกอบด้วยเม็ดสตาร์ชมีลักษณะหยาบเหลี่ยมขนาดประมาณ 2 – 10 ไมครอนจับเป็นกลุ่มแน่น ส่วนโปรตีนมีลักษณะเป็นก้อนกลมขนาด 1 – 4 ไมครอนแทรกอยู่กับเม็ดสตาร์ชที่กระจายตัวอย่างอิสระ โดยมีเม็ดไขมันอยู่ใกล้ ๆ แต่มีในปริมาณน้อยกว่าโปรตีน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

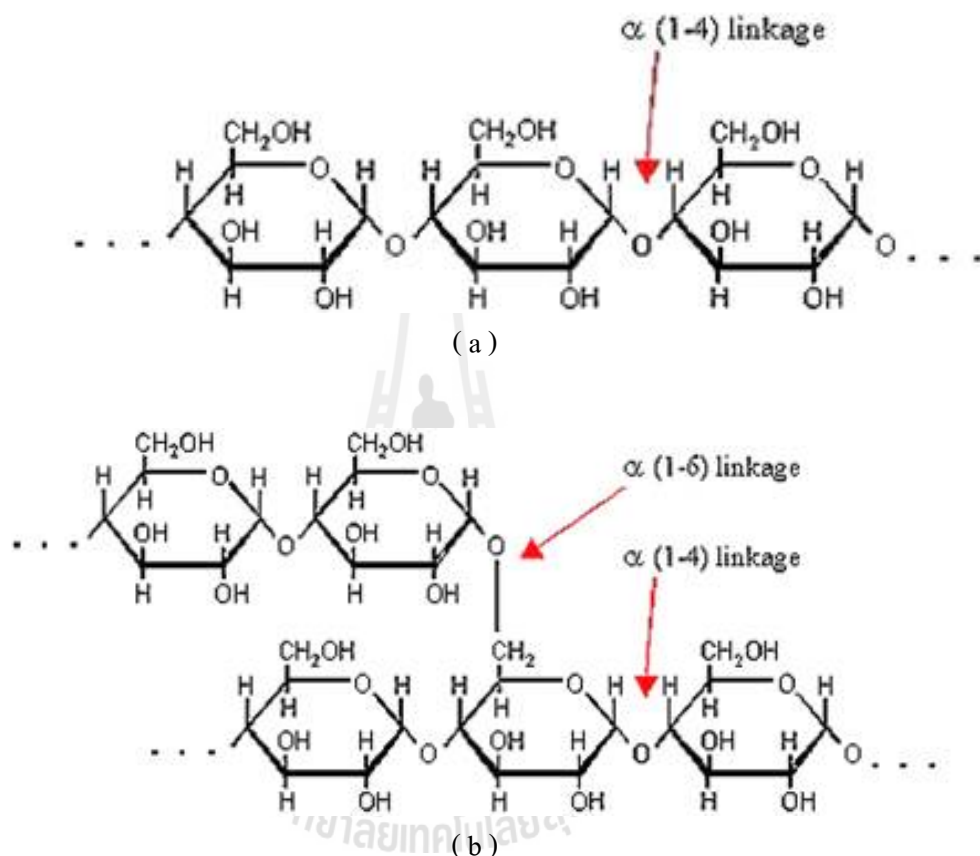
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมล็ดข้าวคือคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำ หรือความชื้น

2.1.2.1 สตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุด ในเนื้อเมล็ดของข้าว เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างลักษณะเป็นหลายเหลี่ยมและมีขนาดเล็กระมาณ 2-9 ไมครอนรวมตัวกันอยู่ภายในอะไมโลพลาสต์ (amyloplast) จำนวน 20-60 เม็ดสตาร์ชเป็นกลุ่มก้อนกลมหรือยาวรีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มเม็ดสตาร์ชในอะไมโลพลาสต์นี้ประมาณ 7-39 ไมครอน โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวที่มีขนาดใหญ่โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยสารประกอบทางเคมี 2 ชนิด คือ อะมิโลส และอะมิโลเพกติน โดยอะมิโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบขดเป็นเกลียวแบบฮิลิกซ์ (helix) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic bond และ

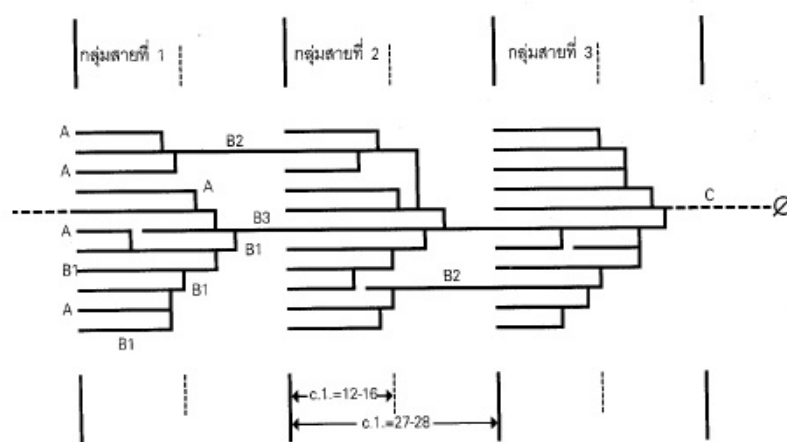
ส่วนน้อยเป็น α -1,6-glucosidic bond ในขณะที่อะไมโลเพกตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสโดยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic bond ในขณะที่ส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic bond ดังแสดงในรูปที่ 2.2



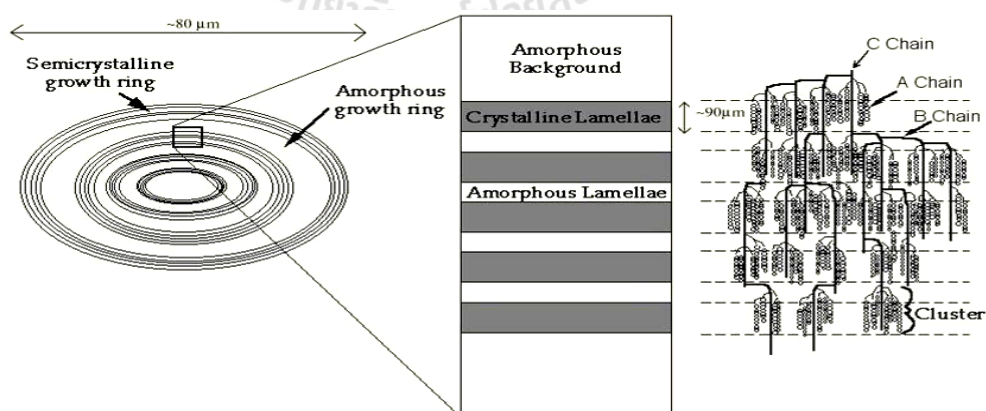
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (a) อะมิโลส (b) อะไมโลเพกติน
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

Hizukuri (1996) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพกตินดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพกตินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิดคือสาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่าสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหน่วยรีดิวง 1 หน่วยในอะไมโลเพกตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย 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 โดยปกติเมล็ดสตาร์จะไม่วะลายในน้ำเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมน้ำกับเมล็ดสตาร์นั้น เมล็ดสตาร์จะดูดซึมน้ำเข้าไป พองตัวมากขึ้น จนในที่สุดจะแตกออก ทำให้เกิดความหนืดขึ้น เรียกว่า เจลลาติไนเซชัน ลักษณะที่สำคัญนี้มีผลต่อการนำไปแปรรูปเป็นอาหารชนิดต่าง ๆ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ซึ่งปริมาณอะมิโลสมีผลต่อเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวสุก ความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งข้าวเหนียวการขยายปริมาตรความแข็งแรงความขาว และความเลื่อมมันของเมล็ดข้าวสุก (Juliano, 1971) เป็นสาเหตุทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวลดลงหรือร่วนมากขึ้น และทำให้ข้าวนุ่มน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการคืนตัวของอะมิโลส (Retrogradation) (ชนิดา หันสวาสดี พิระศักดิ์ ฉายประสาท และปทุมทริกา รัตนศรีวงศ์, 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 โปรตีนชนิดนี้เป็นโปรตีนหลักที่พบอยู่เป็นจำนวนมากในข้าวและสามารถแยกออกมาได้โดยการใช้สารละลายต่างดั่งนั้นในกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ข้าวทั่วไปจึงใช้การล้างแป้งฟลาวร์ข้าวด้วยสารละลายด่างโปรตีนในข้าวมีกลูเตลินเป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโอริซีนิน (Oryzenin) (Matsuo, Futsuhara, Kikuchi and Yamaguchi, 1997)

2.1.2.3 ไขมัน

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

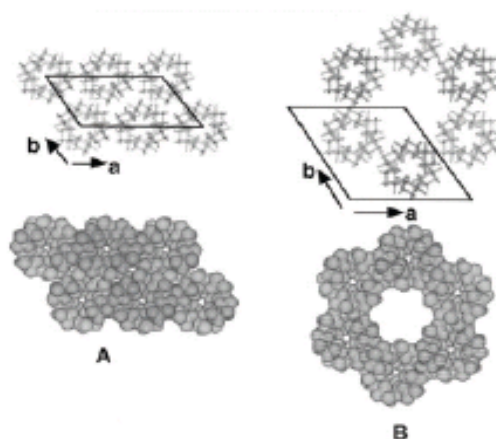
(glycolipids) เทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ไขมันสามารถทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เกิดเป็นสารกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดสารที่ให้กลิ่นเหม็นหืนได้ เช่นเดียวกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันก็ทำให้เกิดกลิ่นหืนได้เช่นกัน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

2.2 คุณสมบัติของข้าวและแป้งข้าว

2.2.1 ลักษณะทางโครงสร้างผลึก

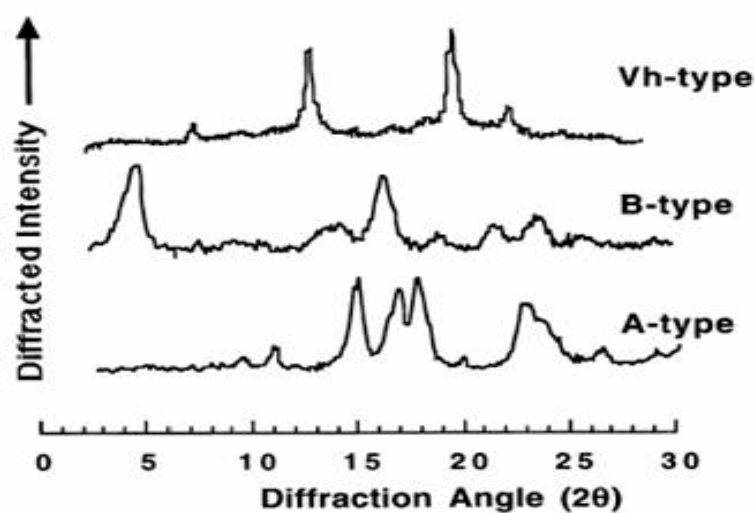
เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ (รูปที่ 2.5) ถ้ามีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้ามีการจัดเรียงตัวกันหลวม ๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะเกิดผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ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

แป้งสตาร์ชมีโครงสร้างผลึกแบบกึ่งผลึก (semi-crystallinity) คือมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) โครงสร้างผลึกที่ต่างกันของแป้งสตาร์ชจะส่งผลให้มีลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ลักษณะทางโครงสร้างและปริมาณผลึกสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคทางการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry) ซึ่งแป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคคู่ (doublet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ $17-18^\circ$ และพีคเดี่ยว (singlet peak) ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 23° แต่ไม่มีพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6° ซึ่งจะพบในสตาร์ชที่มาจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่แป้งสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้ singlet peak ที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6° และ 17° แต่ไม่มีพีคที่ตำแหน่ง 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)



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด A และ B

ที่มา : Buleon et al. (1998)



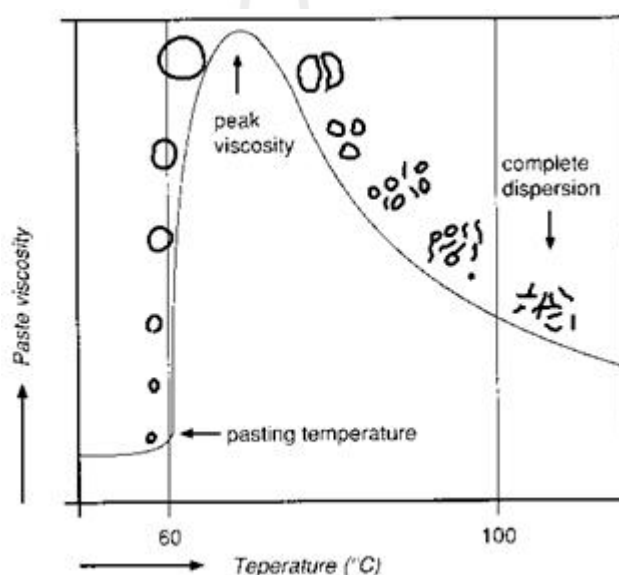
รูปที่ 2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A, B และ Vh

ที่มา : Buleon et al. (1998)

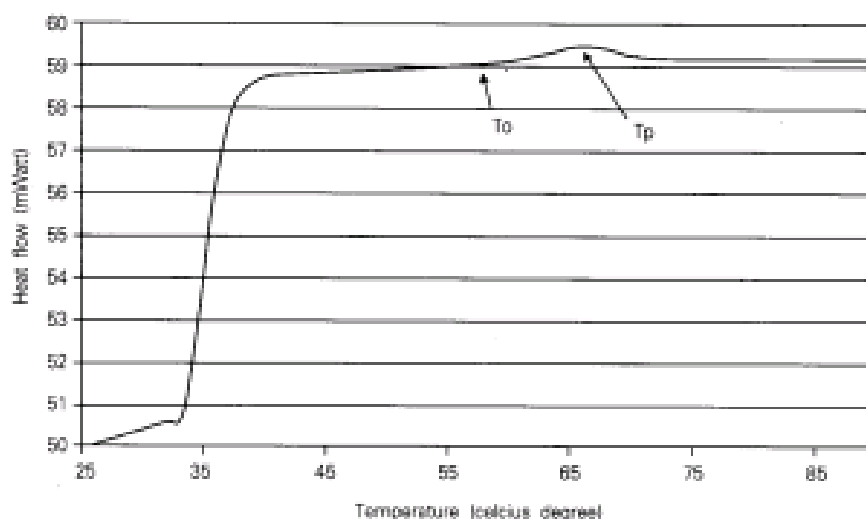
2.2.2 สมบัติการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยากในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งสามารถดูดน้ำและพองตัวได้เพียงเล็กน้อยแต่เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งพันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงทำให้เม็ดแป้งสามารถดูดน้ำและพองตัวได้มากขึ้นทำให้น้ำแป้ง

มีความหนืดมากขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นเกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ดังรูปที่ 2.7 ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชันของแป้งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) (รูปที่ 2.8) และให้ผลเป็นค่าพลังงานเรียกว่าค่าเอนทัลปี (ΔH) (Zobel et al., 1988) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของแป้งได้แป้งที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมากมีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชันมากเนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการพอง



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน
ที่มา : กล้าณรงค์ ศิริรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

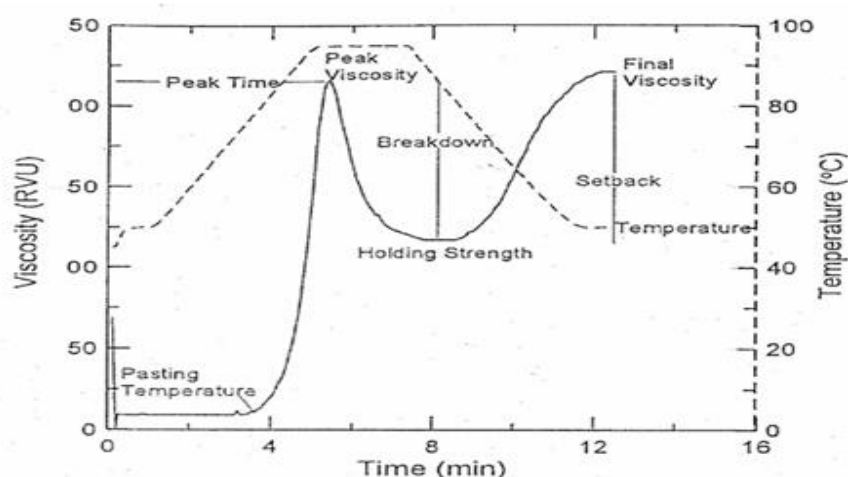


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสารผสมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำ (30 : 70) (To = Onset temperature, Tp = Peak temperature)

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.2.3 พฤติกรรมทางความหนืด

การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายน้ำแป้งในขณะที่ได้รับ ความร้อนและเกิดเจลลาติไนซ์เซชันสามารถกระทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้วัดมีหลายชนิด เช่นการใช้เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) เครื่องบราเบนเดอร์อะมิโล กราฟ (Brabenderamylograph) และเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นต้นสามารถติดตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting curve) ของสารละลายน้ำแป้ง ขณะทำให้ร้อนและเย็นได้แสดงดังรูปที่ 2.9 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)



รูปที่ 2.9 กราฟที่ได้จากการความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer
ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2546)

2.3 การแปรรูปอาหารโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเหวี่ยง เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่าง ๆ ได้แก่ การผลิตอาหารขบเคี้ยวประเภทพองตัวทันที อาหารขบเคี้ยวประเภทที่ต้องผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดการพองตัวในภายหลัง อาหารเข้าัญชาติ พาสต้า เป็นต้น เป็นกระบวนการที่รวมหลาย ๆ กรรมวิธีเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การคั้น การนวด การเหวี่ยง การขึ้นรูป ซึ่งในการผลิตอาหารด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีข้อดีมากมาย ทำให้กระบวนการแปรรูปอาหารง่ายขึ้น (วิไล รังสาตทอง, 2547) เพิ่มความหลากหลายของอาหาร โดยเพิ่มชนิดของอาหารจากส่วนผสมพื้นฐานให้มีรูปร่าง เนื้อสัมผัส สี กลิ่น รส แบบต่าง ๆ เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ประหยัดเวลา พลังงานและแรงงาน รวมถึงพื้นที่สำหรับการผลิต ให้อัตราการผลิตสูง นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่ใช้อุณหภูมิสูง เวลาสั้น (HTST) ซึ่งสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้อีกด้วย (Harper, 1981)

2.3.1 หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์

หลักการทำงานของเอกซ์ทรูเดอร์ คือ วัตถุดิบจะถูกส่งไปที่ส่วนรับวัตถุดิบ (feed hopper) จากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเอกซ์ทรูเดอร์ วัตถุดิบจะหลอมเหลวอยู่ในรูปคล้ายพลาสติก เนื่องจากความดันสูง อุณหภูมิสูง และแรงเหวี่ยง (shear force) ที่เกิดขึ้นในบารเรล จากนั้นวัตถุดิบจะอยู่ในรูปของโด 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) จำกัความของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปหมายถึงผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จากการทำแป้งให้ขึ้นร้อนหนืดเหนียวจนกระทั่งกลายเป็นเจล (แป้งสุก) ได้อย่างสมบูรณ์แล้วอัดผ่านรูเปิดของหน้าแปลนหรือรีดให้เป็นแผ่นออกมาแล้วตัดเป็นชิ้นหรือแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นจนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 12 โดยน้ำหนักหรือน้อยกว่าเพื่อให้เก็บไว้ได้นานแต่เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนของกระบวนการผลิตเพิ่มเข้ามาอีกจึงจะรับประทานได้ซึ่งขั้นตอนการผลิตที่เพิ่มเข้ามานี้เป็นตัวทำให้เกิดรูปร่างปรากฏขึ้นหรือเกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่เป็นจริงตามสภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ตามแบบชนิดของขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตที่เพิ่มเข้ามาซึ่งอาจประกอบด้วยการทอดในน้ำมันการอบด้วยความร้อนสูงหรือการคั่วสุก (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 อันมีความยาวเท่ากันอยู่ในบาริลเดียวกันเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่ยังแบ่งได้หลายชนิดขึ้นกับแบบของสกรู (screw configuration) โดยขึ้นอยู่กับการหมุนของสกรูทั้งคู่ (แบบหมุนตามกันและแบบหมุนตรงข้ามกัน) และลักษณะของสกรูที่ซ้อนกัน (สกรูซ้อนกันและสกรูไม่ซ้อนกัน)

อย่างไรก็ตามเครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยวมีการใช้ประโยชน์ค่อนข้างจำกัดและมักมีปัญหาในการส่งผ่านส่วนผสมที่มีความหนืดต่ำเครื่องอัดพองแบบสกรูคู่จะเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากใช้ได้กับวัตถุดิบหลายประเภทรวมทั้งใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นหลายระดับและวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันปานกลางด้วย (กมลวรรณ แจ้งชัด, 2541)

การเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบที่เกิดขึ้นภายในบาริล ส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ จำนวนมาก ทั้งทางด้านเครื่องมือและวัตถุดิบ เช่น ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ รูปแบบการจัดเรียงสกรู ความเร็วรอบสกรู อุณหภูมิของบาริล อัตราการป้อนวัตถุดิบ ความชื้นของวัตถุดิบภายในบาริล รูปแบบของหน้าแปลน ค่าแรงที่ทำให้หมุน (Torque หรือค่าแรงทอร์ก) ความดันที่บริเวณหน้าแปลน เป็นต้น (Chang, 2003) น้ำทำหน้าที่ในการถ่ายเท

ความร้อนและเป็นสารหล่อลื่น ช่วยในการควบคุมความดันและแรงเฉือนภายในเครื่องเอกซ்தูเตอร์ (Bhattacharya and Hanna, 1987) Chaikyul, Jangchud, Jangchud, Wuttijumnong and Winger (2009) ทำการศึกษาผลของสภาวะของกระบวนการเอกซ்தูชันต่อสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของขนมพองกรอบที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวเสริมโปรตีน พบว่าที่ปริมาณความชื้นต่ำส่งผลให้อุณหภูมิที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดการเจลาติไนซ์เซชันสูงขึ้นทั้ง Akdogan (1996) ที่ทำการศึกษาผลของความดัน ค่าแรงทอร์ค และพลังงานตอบสนองของกระบวนการเอกซ்தูชันแบบสกรูคู่ที่มีต่อสตาร์ชข้าวความชื้นสูง (57, 60 และ 65%) และ Chuang and Yeh (2004) ที่ทำการศึกษาผลของการเรียงสกรูต่อระยะเวลาที่อาหารอยู่ในบารเรล และการเกิดเจลาติไนซ์เซชันของฟลาวร์ข้าวระหว่างกระบวนการเอกซ்தูชันด้วยเครื่องเอกซ்தูเตอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของบารเรลเพิ่มขึ้น แรงทอร์คจะมีค่าลดลง โดยแรงทอร์คแสดงถึงแรงต้านทานต่อการหมุนของสกรูของเครื่องเอกซ்தูเตอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนืดของอาหารภายในบารเรลทั้ง Ding, Ainsworth, Tucker and Marson (2005) ที่ทำการศึกษาศึกษาผลของสภาวะของกระบวนการเอกซ்தูชันที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของขนมพองกรอบที่ผลิตจากแป้งฟลาวร์ข้าวและผลการศึกษาของ Chaikyul et al. (2009) และ Guha et al. (1997) พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้น ความหนืดของอาหารภายในบารเรลจะลดลง ทำให้มีแรงต้านทานต่อการหมุนต่ำ ค่าแรงทอร์คจึงลดลง Singh, Sekhon and Singh (2007) ทำการศึกษาผลของความชื้น อุณหภูมิ และระดับของการเติมแป้งถั่วลิสงเตาที่มีต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอกซ்தูชันแป้งข้าว พบว่าการเพิ่มอัตราป้อนวัตถุดิบมีผลทำให้ค่าแรงทอร์ค ค่าความแข็ง (hardness) และการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น การขยายตัวของผลิตภัณฑ์จะต่ำลง เนื่องจากเวลาเฉลี่ยที่อาหารอยู่ในบารเรลต่ำ จึงทำให้เกิดการเจลาติไนซ์เซชันอยู่ในระดับที่ต่ำลงและแรงทอร์คจะมีค่าลดลงความดันที่หน้าแปลนจะลดลงเมื่อความชื้นและอุณหภูมิบารเรลมีค่าสูงขึ้นจากผลการศึกษาของอุณหภูมิบารเรลและความเร็วรอบสกรูที่มีต่อกระบวนการเอกซ்தูชันแบบสกรูคู่ของฟลาวร์ข้าว และคุณสมบัติของเอกซ்தูเตอร์ของ Guha, Ali and Bhattacharya (1997) และจากผลการทดลองของ Chaikyul et al. (2009) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลส่งผลให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ค่าแรงทอร์ค ความหนาแน่น และความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำลง นอกจากนี้จากผลการศึกษาของ กมลวรรณ แฉงชัด (2541) พบว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอกซ்தูเตอร์ยังมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันที เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกจากเครื่องเกิดจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกต่ำกว่า 100°C จากผลการศึกษาคุณสมบัติของแป้งมันฝรั่งจากกระบวนการเอกซ்தูชันของ Cheyne, Barnes, Gedney and Wilson (2005) และ

การศึกษาผลของอุณหภูมิ바เรล และความเร็วรอบสกรูที่มีต่อพฤติกรรมความหนืดของแป้งข้าวของ Guha et al. (1998) พบว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะมีความสามารถในการดูดน้ำ (hydrate) ได้เร็วกว่าแป้งตามธรรมชาติ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเกี่ยวกับข้าวขึ้นรูป ข้าวหุงสุกเร็ว และข้าวเสริมคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มอาหารเหล่านี้กำลังได้รับความสนใจจากประชาคมโลกอย่างสูง ดังสิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP5013874B2 ซึ่งทำการผลิตข้าวขึ้นรูปจากข้าวหัก ที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนเมล็ดข้าว ผลิตข้าวขึ้นรูปผสมวิตามินเพื่อแก้ปัญหาการขาดสารอาหารของประชากรบางพื้นที่ทำการผลิตโดยใช้แป้งฟลาวัวร์ข้าวความชื้น 15-35 % เติมน้ำมันพืชไฟเออร์ เติมน้ำ และน้ำมัน ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่อุณหภูมิ바เรล 60-120°C โดยมีระยะเวลาที่แป้งข้าวอยู่ใน바เรลอยู่ในช่วง 1-90 วินาที Keshani (2011) ทำการผลิตข้าวขึ้นรูปเพื่อใช้ในการควบคุมความดันเลือด ชดเชยภาวะโลหิตจาง การขาดแคลเซียม และโปรตีน เพสท์ของแป้งจะถูกกดภายใต้ภาวะสูญญากาศโดยเครื่องโครโมล่า (cromola machine) โดยกดใส่โมลรูปเมล็ดข้าวเพื่อขึ้นรูปทำการทำแห้ง และบรรจุลงบรรจุภัณฑ์สิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR101171258B1 ทำการผลิตข้าวเทียมที่ให้รักษาระดับน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับต่ำ โดยแป้งข้าวขนาดอนุภาค 200-300 ไมโครเมตรผสมกับ Xylose crystal (บริสุทธิ์ 97%) ขนาดอนุภาค 180-200 ไมโครเมตร และผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และขึ้นรูปเมล็ดข้าวโดยใช้โมลสิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP2012139158A ทำการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยใช้สตาร์ชข้าว ผสมอัลจินิก เอซิด ทำให้เป็นเจล ทำแห้ง ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ขึ้นรูปเมล็ดข้าวโดยใช้โมลเพื่อทำให้เป็นรูปเมล็ดข้าวสิทธิบัตรจีนเลขที่ CN102599433A ผลิตข้าวขึ้นรูปเพื่อแก้ปัญหาด้านโภชนาการ โดยผลิตจากแป้งข้าว แป้งจากธัญชาติหลายชนิด เสริมด้วยวิตามิน นำโคของแป้งมาทำเป็นรูปร่างเมล็ดข้าว แล้วทำการอบแห้งสิทธิบัตรจีนเลขที่ CN102578475A ผลิตข้าวโภชนาการสูงเพื่อป้องกันการขาดสารอาหาร และป้องกันโรคต่าง ๆ โดยผสมข้าว ธัญพืช กับน้ำ บดแล้วร่อนด้วยตะแกรง mesh no. 80 ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความเร็วรอบสกรู 160rpm แล้วขึ้นรูปเพื่อให้เป็นรูปเมล็ดข้าว จากนั้นทำการอบแห้งสิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP2012120537A ผลิตข้าวโภชนาการสูงโดยการเติมวิตามินรวม เพื่อแก้ปัญหการขาดแคลนสารอาหารในประชากรแถบอเมริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกากลาง โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันตัดโคของแป้งให้มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว สิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP4953452B2 ทำการผลิตข้าวเทียม โดยวัตถุดิบคือแป้งข้าวผสมแป้งถั่วเหลือง ใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิ바เรล 75-155°C เพื่อนวดแป้ง จากนั้นนำสู่กระบวนการเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิ바เรล 0-95°C เพื่อผสมแป้งข้าวและแป้งถั่วเหลือง ขึ้นรูปเป็นเมล็ดข้าว โดยใช้ extrusion molding หลังจากนั้นจึงทำแห้งสิทธิบัตรจีนเลขที่ CN102396664A ทำการผลิตข้าวหุงสุกเร็วโดยใช้ใช้กรรมวิธีอัดแป้งสุกเป็น pellets สิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR1020120008735A ทำการผลิตข้าวเทียมเสริมโภชนาการ โดยการแช่

ข้าวในน้ำอุณหภูมิประมาณ 5-20°C ล้าง 1-5 ครั้ง ทิ้งให้แห้ง บดแล้วร่อนด้วยตระแกรงร่อน mesh no.50 ผสมกับ medical plant ในอัตราส่วนแป้งข้าว:medical plant คือ 30:70 นึ่งส่วนผสมที่อุณหภูมิ 90-120°C ระยะเวลา 10-60 นาที ขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันให้มีขนาด 0.5-10 mm ทำให้นาน 6-24 ชั่วโมงสิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR1020120008734A ทำการผลิตข้าวขึ้นรูป วัตถุดิบคือแป้งข้าวผสมสาหร่าย โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ขึ้นรูปให้มีขนาด 0.5-10mm สิทธิบัตรญี่ปุ่นเลขที่ JP2011211929A ผลิตข้าวเสริมโภชนาการ วัตถุดิบคือข้าวผสมรำข้าว พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มคุณค่าสารอาหาร เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ Yun (2009) ผลิตข้าวหุงสุกเร็วทำโดยนำข้าวไปแช่น้ำอุ่น จากนั้นอบแห้ง และทำการ Puffing สิทธิบัตรจีนเลขที่ CN1115107C ทำการผลิตข้าวโภชนาการสูงจากข้าวสาลีโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยใช้อุณหภูมิบารเรล 125 - 135°C ขึ้นรูปให้มีขนาดใกล้เคียงกับเมล็ดข้าว Wang, Shen and Wang (1997) ที่ทำการผลิตข้าวหุงสุกเร็วโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันขึ้นรูปเมล็ดข้าวโดยใช้โม่เพื่อทำให้เป็นรูปเมล็ดข้าวและสิทธิบัตรเกาหลีเลขที่ KR1020020026765A ผลิตข้าวขึ้นรูปโดยการนึ่งแป้งข้าวให้สุกแล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

2.4 คุณสมบัติทางรีโอโลยี (Rheology)

รีโอโลยีเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (Flow) และการผิดรูปของวัตถุ (Deformation) ภายใต้การกระทำของแรง (Steffe, 1996) ลักษณะพฤติกรรมของการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ ๆ คือ

1. Newtonian Fluids เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือความเร็วในการกวน ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน แอลกอฮอล์ เป็นต้น

2. Non-newtonian Fluids เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามกฎการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลมีความหนืดไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับการอัตราเฉือน (Shear rate) ลักษณะการไหลแบบนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

- 2.1 พวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent non-newtonian fluids) ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนที่ได้รับ แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับการเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือน นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนซึ่งจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ แสดงดังรูปที่ 2.10

2.1.1 Pseudoplastic เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “shear thinning” ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

2.1.2 Bingham plastic ของไหลประเภทนี้ที่ค่าแรงเฉือนมีค่าต่ำ ๆ จะไม่มีการเคลื่อนที่ แต่เมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึงค่า Yield stress ของไหลจะแสดงพฤติกรรมเหมือน Newtonian fluids ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น ส่วนของไหลพลาสติกนั้นเมื่อออกแรงจนถึงจุด Yield stress ของไหลก็จะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหล Pseudoplastic

2.1.3 Dilatant ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนลักษณะของการไหลประเภทนี้พบเห็นได้ยากกว่าประเภท Pseudoplastic พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “shear thickening” พบได้ในของไหลหรืออาหารลักษณะที่มีตะกอนของแข็งนอนกัน เช่น น้ำแป้ง

2.2 พวกที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent non-newtonian fluids)

ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนแล้วยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือนอีกด้วย ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ได้แก่

2.2.1 ของไหลทิกโซโทรปิก (Thixotropic fluids) ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะลดลงตามระยะเวลา เมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ของไหลที่มีลักษณะการไหลประเภทนี้ได้แก่ วัสดุประเภทสีทาบ้าน และน้ำหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่ เป็นต้น

2.2.2 ของไหลรีโอเพกซิก (Rheopexic fluids) ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน ของสารละลาย Non-newtonian ส่วนใหญ่พบว่าเป็นไปตามสมการยกกำลัง(power law) แสดงดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad (2.1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นเฉือน (Pa)

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน (s^{-1})

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) ($Pa \cdot S^n$)

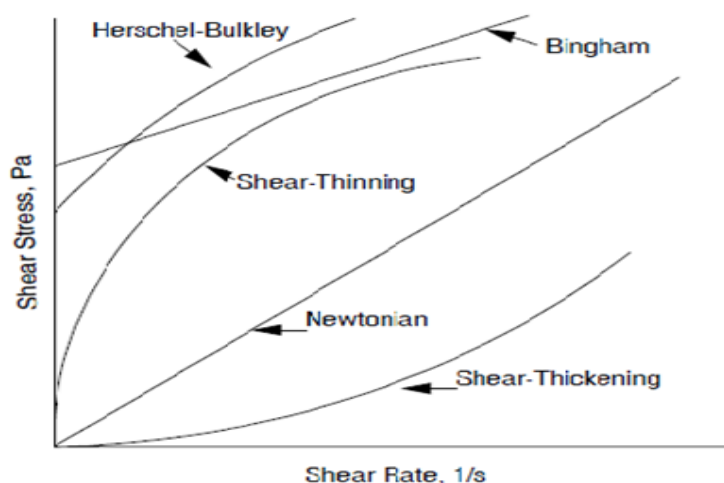
n คือ ดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

โดยสารละลายนอนนิวโตเนียนอาจจำแนกออกโดยใช้ค่า n ที่เบี่ยงเบนออกจาก 1 เมื่อ

$n > 1$, ของไหลมีคุณสมบัติ dilatant หรือ Shear thickening

$n < 1$, ของไหลมีคุณสมบัติ pseudoplastic หรือ Shear thinning

$n = 1$, ของไหลมีคุณสมบัตินิวโตเนียน



รูปที่ 2.10 ลักษณะของพฤติกรรมการไหล

ที่มา : Steffe (1996)

Shiau and Yeh, (2004) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสของแป้งฟลาวัวร์ข้าวสาลีที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง Slit die rheometer และ Capillary rheometer ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยมีอัตราเฉือน $10 - 500 \text{ s}^{-1}$ พบว่าค่าความหนืดปรากฏที่ได้เป็นไปตามสมการยกกำลังและเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น ($50 - 80^{\circ}\text{C}$) ค่า n จะมีค่าลดลง แต่ค่า k จะมีค่าสูงขึ้น Dautant, Simancas, Sandoval and Muller (2007) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิบารเรล ความชื้น และปริมาณไขมัน ต่อคุณสมบัติทางวิทยากระแสของแป้ง ฟลาวัวร์ข้าว โดยใช้ Capillary rheometer พบว่า แป้งฟลาวัวร์ข้าวมีพฤติกรรมการไหลแบบ pseudoplastic และเป็นไปตามสมการยกกำลัง เมื่ออุณหภูมิบารเรล ($90 - 150^{\circ}\text{C}$) ความชื้น ($21 - 29\%$) และปริมาณไขมัน ($3 - 7\%$) เพิ่มขึ้น ค่า n จะมีค่าลดลง และ Xie et al. (2009) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิทยากระแสของสตาร์ชข้าวโพดที่มีสัดส่วนปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่แตกต่างกัน ศึกษาด้วย Capillary rheometer ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าทุกสภาวะการทดลองเป็นไปตามสมการยกกำลัง เมื่อความชื้น และอุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น ค่า k จะมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดปรากฏจะมีค่ามากขึ้น แต่ค่า n จะมีค่าลดลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ

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

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°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิด สมดุลของความชื้น

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 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตรเติมเอทานอลความเข้มข้น 95% ปริมาณ 1 มิลลิลิตรเขย่าเบา ๆ เพื่อให้แป้ง กระจายตัวเติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาณ 9 มิลลิลิตรนำไปต้มในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ 100 °C นาน 10 นาทีทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรดูดสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมได้มา 5 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาณ 1 มิลลิลิตรและ สารละลายไอโอดีนปริมาณ 2 มิลลิลิตรแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีนำไปวัดค่าความเข้มสีของสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโต มิเตอร์โดยอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแสง 620 นาโนเมตรโดยใช้อะมิโลสบริสุทธิ์ใน การสร้างกราฟมาตรฐาน โดยนำอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.04 กรัมเตรียมเป็นสารละลายแป้งเช่นเดียวกับ ตัวอย่างทิ้งไว้ค้างคืนเขย่าให้เข้ากันแล้วดูดสารละลายอะมิโลสมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตรใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตรจากนั้นเติม กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัลปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิลิตรตามลำดับเติม สารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตรลงในแต่ละขวดแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นของอะมิโลสกับค่าการดูดกลืนแสงคำนวณปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ ได้กับกราฟมาตรฐานแล้วแสดงค่าเป็น % 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 อัตราส่วน ความยาวเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D) เท่ากับ 25:1 มีรูปแบบการจัดเรียงสกรู เป็นแบบผลิตภัณฑ์ไม่พองตัว (non-expanded product) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในขณะที่ผนังบาริล มีหน่วยให้ความร้อนที่สามารถแบ่งการควบคุมอุณหภูมิได้ 4 ช่วง โดยควบคุมอุณหภูมิของบาริล ในช่วงที่ 1 ไว้ที่ 55 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิของบาริลช่วงที่ 2, 3 และ 4 ไว้ที่ระดับ อุณหภูมิเดียวกัน เป็น 2 ระดับคือ 90 และ 110 องศาเซลเซียสตามลำดับ (ตารางที่ 3.2) และป้อนแป้ง

ข้าวเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ผ่านทางถังป้อน ที่ได้ถังมีเกลียวสกรูเป็นตัวป้อนแบบปริมาตร (K-tron Crop., Pitman, NY, USA) ป้อนวัตถุดิบด้วยอัตราประมาณ 0.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นั้นทำการปรับความชื้นให้มีปริมาณตามที่ต้องการสองระดับคือ 28% และ 33% รูปแบบการตั้งอุณหภูมิ바เรลแสดงดังตารางที่ 3.1 ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาทีหน้าแปลน (die) ที่ใช้ขึ้นรูปเป็นรูปทรงเมล็ดข้าว แผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.3 เมื่อค่าแรงทอร์กคงที่ เก็บข้อมูลจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เช่น อุณหภูมิของเอกซ์ทรูเดต (product temperature) อุณหภูมิในแต่ละช่วงของ바เรล 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

ตารางที่ 3.2 การตั้งอุณหภูมิของบาริล

อุณหภูมิบาริล (°C)	อุณหภูมิบาริลช่วงที่ 1-4 (°C)
90	55/ 90/ 90/ 90
110	55/ 110/ 110/ 110

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

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

3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป

3.4.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป (Appearance of reformed rice)

ตรวจสอบลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้กับข้าวสารพันธุ์ชัยนาทด้วยวิธีการถ่ายรูป

3.4.2 การทดสอบคุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

3.4.2.1 การหาระยะเวลาในการหุงต้ม (cooking time)

ดัดแปลงจากวิธีการของ Singh et al. (2007) โดยชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5 กรัม ใส่ในกระป๋องโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตรเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาณมากเกินพอนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 °C 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 เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาณมากเกินพอนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 °C จนกระทั่งสุก ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการหุงต้ม จากนั้นนำตัวอย่างไปลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในอ่างน้ำแข็ง แล้วพักบนตะแกรงเพื่อสะเด็ดน้ำเทใส่กระดาษชำระทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหุงต้ม

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

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 นำไปวัดสมบัติทางเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง 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

3.4.5 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

(scanning electron microscope; SEM)

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

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป

3.5.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวขึ้นรูป

3.5.1.1 การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ช (degree of gelatinization)

การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้คัดแปลงจากวิธีของ Chaing and Johnson (1977) โดยเตรียมแป้งเจลลาติไนเซชันสมบูรณ์โดยการออโตเคลฟแป้งข้าวเจ้าความเข้มข้น 2% (w/w) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นผสมกับเมทานอลด้วยปริมาณ 3 เท่า กรอง ทำแห้งและบดเพื่อรอใช้งานต่อไป ชั่งแป้งข้าวขึ้นรูป 25 มิลลิกรัมใน centrifuge tube ขนาด 50 มิลลิลิตรสำหรับตัวอย่างแป้งข้าวขึ้นรูปเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตรตัวอย่างแป้งข้าวที่เจลลาติไนเซชันสมบูรณ์ เติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วเติมสารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาณ 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการย่อยด้วยเอนไซม์ amyloglucosidase ที่ 40°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วหยุดปฏิกิริยาด้วยสารละลาย trichloroacetic acid ความเข้มข้น 25% ปริมาณ 2 มิลลิลิตร บั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 g เป็นเวลา 5 นาที สารละลาย

ส่วนไอที่ได้นำมาทำปฏิกิริยากับ PGO enzyme (Sigma, P7119) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 440 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) โดยใช้กลูโคสบริสุทธิในการสร้างกราฟมาตรฐานคำนวณระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันจากสมการ

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

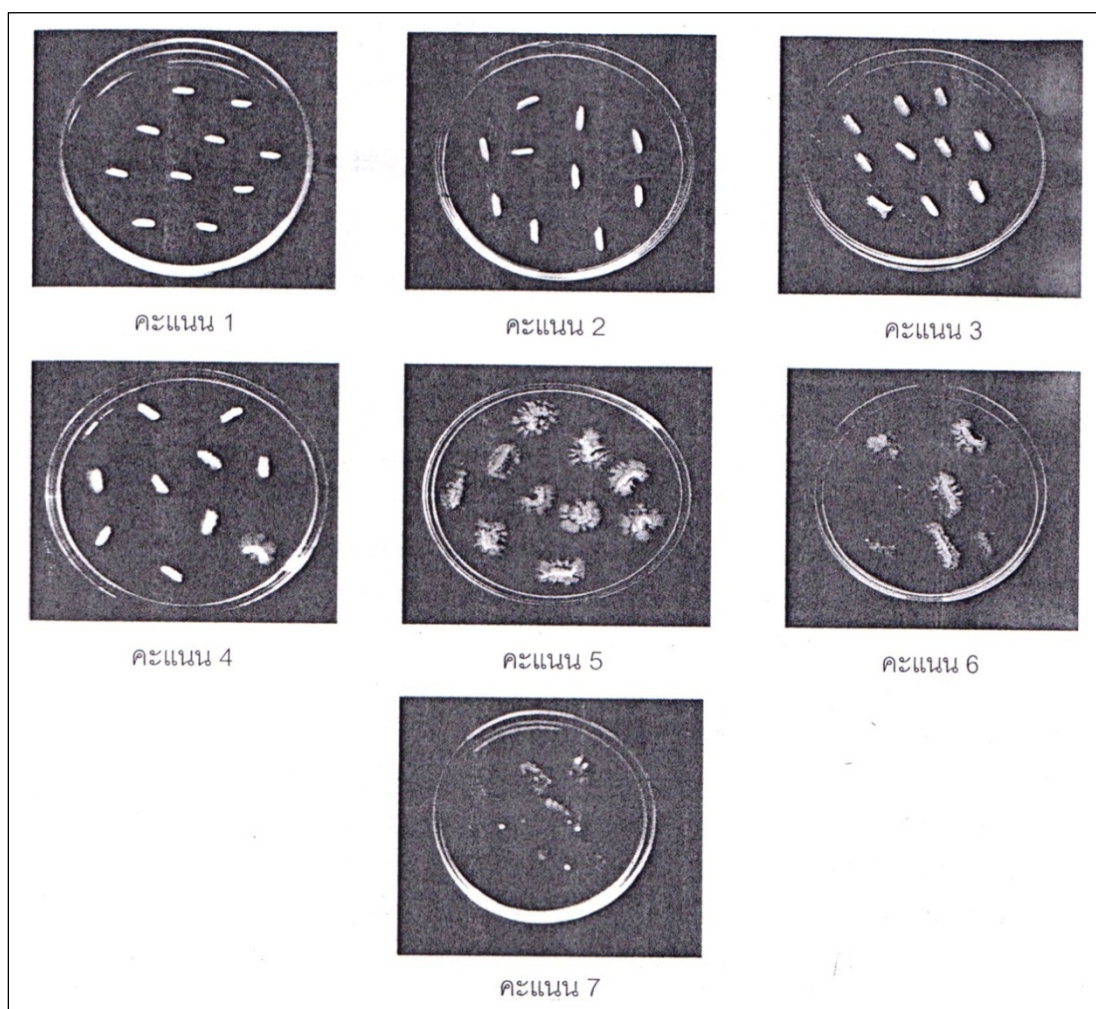
- เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแป้งเจลลาติไนเซชันสมบูรณ์
 B = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 30 นาที
 C = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 60 นาที
 k = ค่าการดูดกลืนแสงของ 1% of intact sample ที่ผ่านการย่อย 30 นาที
 Y = ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันของตัวอย่าง (%)

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

ศึกษาความสามารถในการอุ้มน้ำและละลายน้ำ ตามวิธีการของกล้านรงค์ ศรีรอดและ เกื้อกุลปิยะ จอมขวัญ (2546) ซึ่งดัดแปลงจาก Schoch (1964) โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม (คิดต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) ลงในหลอดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยง (ที่ทราบน้ำหนักหลอดเริ่มต้นแล้ว) เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 6 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากัน จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสด้วยความเร็ว 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

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

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



รูปที่ 3.1 ลักษณะเมล็ดข้าวที่สลายตัวในสารละลายเบส
ที่มา : อรอนงค์ นัยวิกุล (2547)

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 รังสีเอกซ์ถูกส่งผ่านในแนวนอนสู่วัสดุใส่ตัวอย่างที่วางในแนวตั้ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ระยะทางจากตัวอย่างถึงตัวรับ

สัญญาณ (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 จากนั้นปิดฝาให้สนิทบ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาติไนเซชันด้วย DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจาก 5 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยใช้ภาชนะสแตนเลสเปล่าเป็นตัวอ้างอิงทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (peak temperature, T_p), อุณหภูมิสุดท้ายของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (conclusion temperature, T_c) และช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลาติไนเซชัน ($T_c - T_o$) โดยใช้โปรแกรม STARsoftware (Mettler-Toledo)

3.5.2 คุณสมบัติทางความหนืด

3.5.3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดสตาร์ชเพสต์ (pasting properties)

วิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดสตาร์ชเพสต์ ตามวิธีของ Guha et al. (1998) โดยวัดความหนืดด้วยเครื่อง Rapid viscoanalyser (RVA, Newport Scientific Pty, Ltd., Australia) ตัวอย่างคิดจากน้ำหนักแห้ง 3 กรัมที่ความชื้น 14 % ใส่ใน aluminum RVA sample canister เติมน้ำกลั่นลงไปให้น้ำหนักรวมได้ 28 กรัมจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 95 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิตัวอย่างที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และลดอุณหภูมิกลับไปที่ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อนาที และรักษาอุณหภูมิตัวอย่างที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที ค่าที่บันทึกคือค่าของอุณหภูมิ ได้แก่ peak viscosity (PV), peak time (PT), setback (SB), Final viscosity (FV) และ breakdown (BD)

3.5.3.2 ผลของพฤติกรรมการไหล

ศึกษาผลของพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวขึ้นรูปซึ่งผลิตที่สภาวะต่าง ๆ คัดแปลงตามวิธีการของ Doublier, Colona and Mercier (1986) โดยเตรียมแป้งความเข้มข้น 20% ในขวดแก้วมีฝาปิดนำมาให้ความร้อนโดยอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปศึกษาผลของพฤติกรรมการไหลด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทางวิทยากระแส (AR-G2 Rheometers, TA Instruments, New Castle, USA) โดยใช้ parallel plate ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ทำการวัดค่าความถี่ที่อัตราการเฉือนในช่วง $1 - 1,000 \text{ s}^{-1}$ ระยะห่างระหว่าง plate 4,000 μm ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C ศึกษา

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ (mathematical model) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) และค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (flow behavior index) ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลโดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน พบว่าเป็นไปตามสมการยกกำลัง (power law) แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad (3.1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นเฉือน

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) (Pa.s^n)

n คือ ดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

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 ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (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

ทำการศึกษาเบื้องต้นการผลิตข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันโดยใช้ข้าวสองพันธุ์คือ 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 สภาพะการผลิตดังกล่าวไม่สามารถผลิตข้าวขึ้นรูปได้ ผลิตภัณฑ์ที่ออกสู่หน้าแปลนมีความเหลว ไม่สามารถตัดด้วยใบมีดให้มีรูปร่างลักษณะเป็นเมล็ดข้าวได้ จึงได้ทำการเปลี่ยนพันธุ์ข้าวเป็นพันธุ์ชัยนาท ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสสูง (32.9%) และจำกัดขอบเขตของการทดลองโดยลดปริมาณความชื้นลงอยู่ในช่วง 28 – 33% ทำการปรับความชื้นแป้งข้าวให้ได้ตามที่ต้องการก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปและอุณหภูมิ바เรลช่วงที่ 1 คือ 55°C อุณหภูมิ바เรลช่วงที่ 2 – 4 คงที่ที่อุณหภูมิ 90°C และ 110°C

ตารางที่ 4.1 การตั้งอุณหภูมิของบาริล

อุณหภูมิของบาริลช่วงที่ 3 (°C)	อุณหภูมิบาริลช่วงที่ 1-4 (°C)
95	55/ 90/ 95/ 95
120	55/ 90/ 120/ 95

ตารางที่ 4.2 แผนการทดลองที่ใช้ในการขึ้นรูปข้าวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันพันธุ์ข้าวขาว
ดอกมะลิ 105 (KDML105) และ พันธุ์สุพรรณบุรี 90 (SPBR 90)

สถานะการทดลองที่	พันธุ์ข้าว	อุณหภูมิบาริลช่วงที่ 3 (°C)	ความชื้นของวัตถุดิบภายในบาริล (%)
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

4.3 ผลของสถานะการผลิตต่อลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป

4.3.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูป (Appearance of reformed rice)

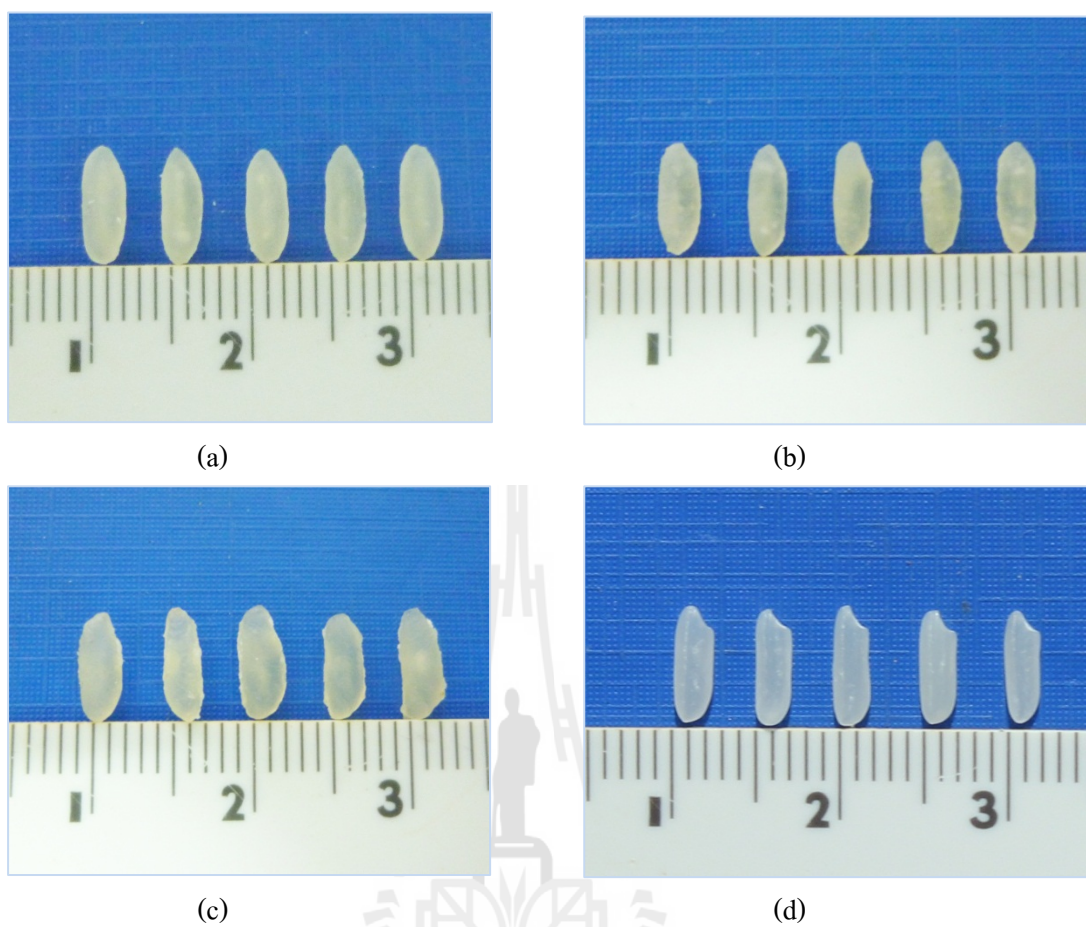
ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยเปรียบเทียบข้าวขึ้นรูปที่ได้กับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท พบว่าข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีรูปร่างลักษณะปรากฏคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท จากผลการทดลอง พบว่าที่สถานะการผลิตที่ความชื้น (extrusion moisture, em) 33% และอุณหภูมิบาริล 110°C (em33% + 110°C) ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ออกจากบาริล มีลักษณะเหนียวจนไม่สามารถตัดด้วยใบมีดให้เกิดเป็นลักษณะเม็ดข้าวได้ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้แสดงดังรูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณาจากค่าทอร์กจะพบว่าค่าทอร์กของสภาวะการผลิตที่ $em\ 33\% + 110^{\circ}C$ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการผลิตอื่น ๆ เนื่องจากการเพิ่มความชื้นวัตถุดิบในช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในระดับต่ำ (low water content) ทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชันหรืออุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของแป้งข้าวมียาลดลง เมื่ออุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้นทำให้เม็ดแป้งถูกทำลายได้มากขึ้น ส่งผลให้แป้งเกิดเจลลาติไนเซชันได้มากยิ่งขึ้น ทำให้ได้ที่อยู่ภายในบาร์เรลจะมีความเหลว มีความหนืดต่ำ มีแรงต้านการหมุนของสกรูภายในบาร์เรลต่ำ ซึ่งค่าทอร์ก หมายถึงค่าความต้านทานต่อการหมุนของสกรูในบาร์เรล ซึ่งสัมพันธ์กับความหนืดของอาหารภายในบาร์เรลจึงทำให้ค่าทอร์กมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการผลิตอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.3 เมื่อปริมาณความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้น ความหนืดของอาหารภายในบาร์เรลจะลดลง ทำให้ความต้านทานการหมุนของสกรูในบาร์เรลต่ำ ค่าทอร์กจึงต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chaiyakul, Jangchud, Jangchud, Wuttijumnong and Winger (2009); Chuang and Yeh (2004); Ding, Ainsworth, Tucker and Marson (2005); Guha, Ali and Bhattacharya (1997) ทำให้ไม่สามารถทำการตัดให้มีลักษณะเป็นเม็ดข้าวได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ออกจากบาร์เรลมีความหนืดน้อยไปซึ่งความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าทอร์ก (%) ที่สภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



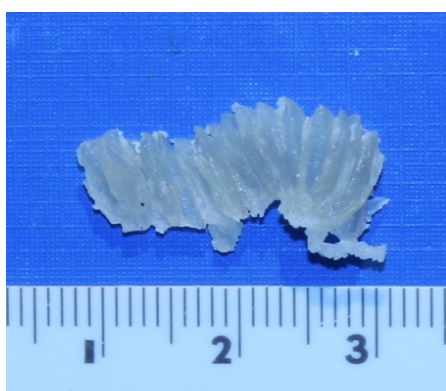
รูปที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90°C
 (b) em28% + 110°C (c) em 33% + 90°C (d) ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท
 (em : extrusion moisture)



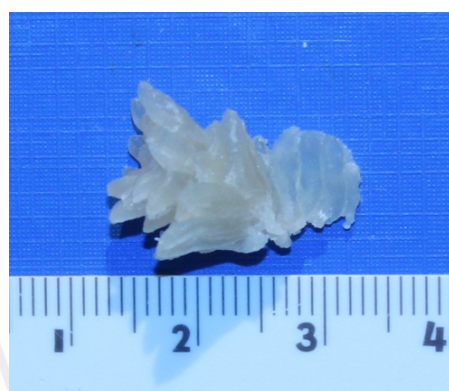
(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



(6)

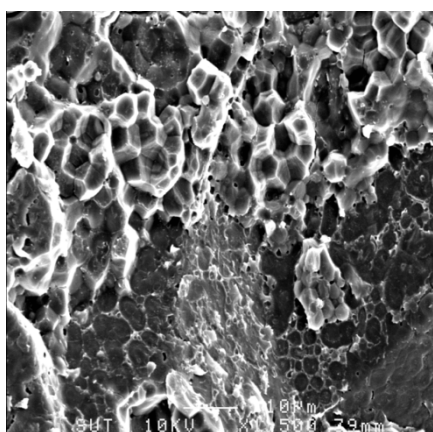
รูปที่ 4.2 ลักษณะของตัวอย่างที่ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้ที่สภาวะการผลิตที่
em 33% + 110°C

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูป

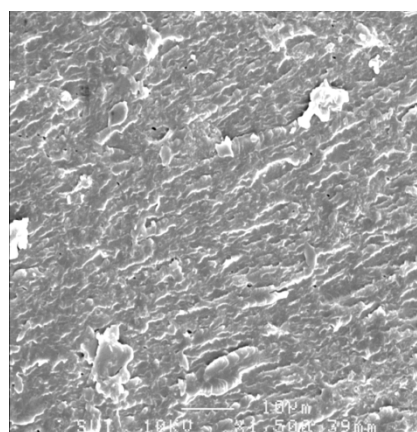
สภาวะการทดลอง	ความสามารถในการตัดเพื่อขึ้นรูป
em 28% + 90°C	แป้งข้าวที่ทำการเอกซเรย์ สามารถตัดด้วยใบมีดตัดได้ลักษณะข้าวเป็นเม็ล็ด ตัดได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสภาวะการทดลอง
em 28% + 110°C	แป้งข้าวที่ทำการเอกซเรย์ สามารถตัดด้วยใบมีดตัดได้ลักษณะข้าวเป็นเม็ล็ดตัดได้ดีพอประมาณ แป้งข้าวที่ออกจากหน้าแปลนจะเหลวกว่าที่สภาวะการทดลองที่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

4.3.2 โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

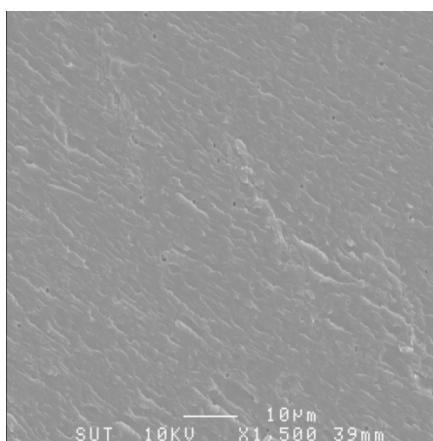
จากการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวขึ้นรูปและข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในภาคตัดขวาง (cross section) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าเม็ล็ดข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 จะพบเม็ล็ดสตาร์ชข้าวดิบซึ่งมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมอัดเรียงตัวกันดังแสดงในรูปที่ 4.3 (a) ในขณะที่ข้าวขึ้นรูปจะไม่พบลักษณะดังกล่าว คือไม่พบลักษณะรูปหลายเหลี่ยมของเม็ล็ดสตาร์ชข้าว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (b), (c) และ (d) เนื่องจากข้าวขึ้นรูปผ่านกระบวนการเอกซเรย์ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนโดยเป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเฉือน ทำให้โมเลกุลของเม็ล็ดสตาร์ชถูกทำลายด้วยแรงกล แรงเฉือนและความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเปิดออกทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายใน ทำให้เม็ล็ดสตาร์ชของข้าวขึ้นรูปเกิดการหลอมเหลว และสูญเสียโครงสร้างที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมไป เมื่อพิจารณาภาคตัดขวางของข้าวขึ้นรูปในทุกสภาวะการทดลอง พบว่ามีลักษณะเป็นแป้งหลอมตัวอัดกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน



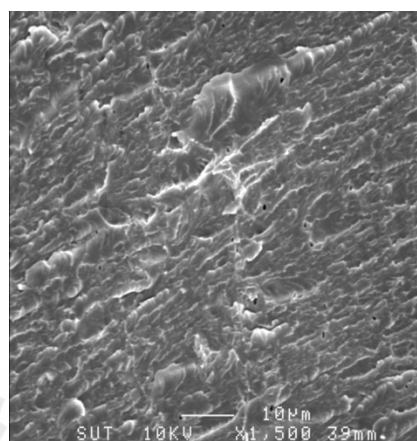
(a)



(b)



(c)



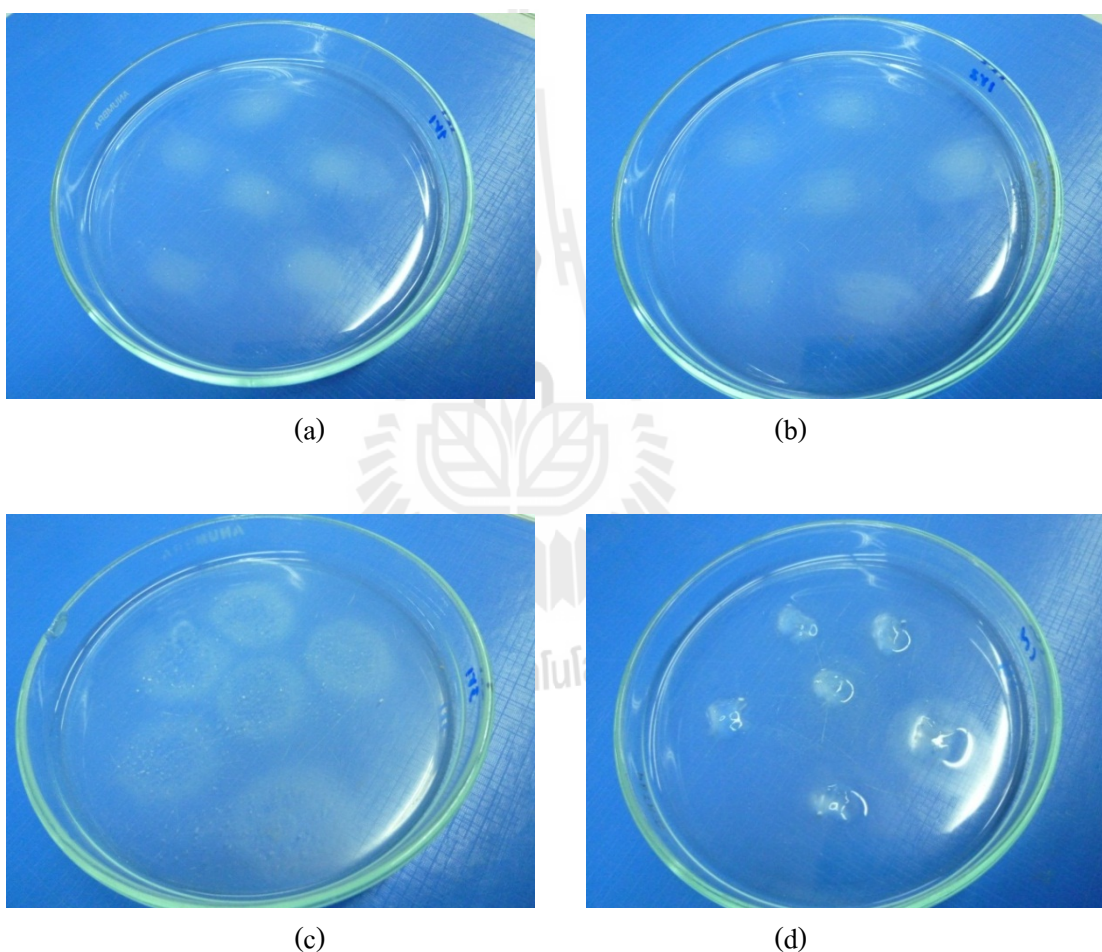
(d)

รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของข้าวต่าง ๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด
ส่องกราด (SEM) : ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท (a) em 28% + 90°C
(b) em 28% + 110°C (c) และ (d) em 33% + 90°C

4.3.3 สมบัติการสลายตัวในสารละลายเบส

การทดสอบการสลายตัวของข้าวขึ้นรูปในสารละลายเบสเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อแช่เมล็ดข้าวขึ้นรูปในสารละลายเบสทิ้งไว้ 23 ชั่วโมง ข้าวขึ้นรูปมีค่าการสลายตัวในสารละลายเบสที่ระดับคะแนนสูงสุด คือ ระดับคะแนน 7 เมล็ดข้าวสลายตัวหมดโดยไม่เห็นลักษณะเมล็ดข้าวเหลืออยู่ ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมีค่าการสลายตัวในสารละลายเบสที่ระดับคะแนนต่ำกว่า คือระดับคะแนน 6 เมล็ดข้าวสลายตัวแต่ยังเห็นเนื้อเมล็ดข้าวอยู่ แสดงดังรูปที่ 4.4 การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าข้าวขึ้นรูปมีความสมบูรณ์ (integrity) ของเมล็ดต่ำกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท เนื่องจากข้าวขึ้นรูปเกิดจากการแปรรูปจากแป้งข้าว

โดยผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้สูญเสียโครงสร้างของเมล็ดที่มีตามธรรมชาติไป และสูญเสียโครงสร้างของสตาร์ชแกรนูลซึ่งสัมพันธ์กับผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (รูปที่ 4.3) เมื่อทดสอบโดยการแช่ในสารละลายเบส พบว่าสารละลายเบสจะสามารถแทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวขึ้นรูปได้ดีกว่าเมล็ดข้าวสารที่ยังมีโครงสร้างของเมล็ดตามธรรมชาติอยู่ จึงทำให้มีระดับการสลายตัวในสารละลายเบสที่คะแนนสูงกว่า และสูงที่สุด คือ ระดับคะแนน 7 ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมีระดับการสลายตัวในสารละลายเบสที่คะแนนต่ำกว่า คือ ระดับคะแนน 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 4.5 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 ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Degree of gelatinization, DG)

การศึกษาการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งข้าวขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท โดยอยู่ในช่วง 38 - 65% โดยความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลมมีผลต่อระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิบารเลมเพิ่มขึ้น DG จะมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความชื้นของวัตถุดิบที่ 28 และ 33% เป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำ (low water content) การเพิ่มความชื้นในช่วงนี้ทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชันหรืออุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของแป้งข้าวมีค่าลดลง (Roos, 1995) จึงทำให้แป้งข้าวสามารถเกิดการเจลลาติไนเซชันได้มากขึ้นส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันของข้าวมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นส่วนเมื่ออุณหภูมิภายในบารเลมเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันสูงขึ้น (Chinnaswamy and Hanna, 1988) เนื่องจากอุณหภูมิบารเลมที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานภายในระบบทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นปริมาณความร้อนที่ได้รับมากขึ้นความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในระบบมีปริมาณมากพอในการทำลายเม็ดแป้งที่ปริมาณความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลมสูง โครงสร้างของเม็ดแป้งภายในบารเลมจะถูกทำลายได้มากกว่า (Bilisderis, Page, Maurice and Juliano, 1986) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเจลลาติไนเซชันได้มากขึ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wani et al. (2012) ที่ทำการศึกษาผลของโครงสร้างสัณฐาน ความร้อน และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน ที่พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลายมากขึ้น และเมื่อได้รับความชื้นแป้งจะดูดน้ำ เกิดการพองตัว และโครงสร้างผลึกเกิดการหลอมเหลว แป้งจะสูญเสียไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) และเกิดเจลลาติไนเซชันมากขึ้น และสัมพันธ์กับผลการทดลองของ Zhuang et al. (2009) ที่ทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวอินดิกาที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิบารเลมเพิ่มขึ้น DG จะมีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 4.6 ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน (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 ^e

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.4.2 ดัชนีการดูดซับน้ำและการละลาย

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

WAI และ WSI ของแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท เมื่อความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้น ค่า WAI มีค่ามากขึ้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดแป้ง เมื่ออุณหภูมิบาร์เรลและความชื้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้นหลังจากแป้งได้รับความร้อนทำให้โครงสร้างของแป้งเปื่อยมากขึ้น น้ำสามารถแทรกเข้าไปในเม็ดแป้งได้มากขึ้น (Artz, Warren and Villota, 1990) สัมพันธ์กับระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน ทำให้ค่า DG สูงขึ้น (ตารางที่ 4.6) แป้งสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้นทำให้ WAI สูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษาี้สัมพันธ์กับการทดลองของ 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 ปัตตะเมฆ อรรวรรณ อนันต์คำ และ ศรีสุวรรณ นฤนาทวงศ์สกุล (ม.ป.ป.) ที่ได้ทำการศึกษการผลิตข้าวขึ้นรูปจากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่า WAI ของข้าวขึ้นรูปมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นในปลายข้าวบดเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhuang et al. (2009) ที่ทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวอินดิกา พบว่าเมื่ออุณหภูมิบาร์เรลสูงขึ้น WAI จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนผลที่มีต่อ WSI พบว่าเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการแตกหักได้มากขึ้นเนื่องจากได้รับทั้งความร้อนและแรงเฉือน ดังนั้นเมื่อมีปริมาณเม็ดแป้งที่แตกหักมากกว่าจึงทำให้การละลายของแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Lopes, Batista, Fernandes และ Santiago (2012) ที่ทำการศึกษาคูสมบัติเชิงหน้าที่ ชีวเคมี และคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดแป้งถั่วพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น WSI จะมีค่ามากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้นพบว่าไม่มีผลต่อค่า 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 ยังสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันได้ (DG) (Zhuang et al., 2009) แป้งดิบโดยทั่วไปจะไม่สามารถละลายในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน แต่เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจากบรรยากาศ ได้จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ 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 ส่งผลให้โครงสร้างหรือโมเลกุลของสตาร์ชในบางส่วนเกิดการเปิดออก และหลุดออกจากเม็ดแป้ง มีผลให้โมเลกุลสตาร์ชขนาดเล็กสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น และสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าโมเลกุลสตาร์ชขนาดใหญ่ เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าโมเลกุลของสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น การที่สตาร์ชถูกทำลายทำให้มีระดับการแตกของโมเลกุลมากขึ้นทำให้ของแข็งที่ละลายได้นั้นหลุดออกมามากขึ้น ส่งผลให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการดูดซึมน้ำ (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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนั่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป

4.5.1 คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

ในการหุงต้มข้าวสารให้เป็นข้าวสุกที่สวยและสุกพอดีนั้น ต้องมีระยะเวลาและปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงที่พอดีและเหมาะสมกับปริมาณข้าวสาร การหุงข้าวนานเกินไปทำให้เมล็ดแตก และอาจไหม้การใส่น้ำน้อยหรือมากเกินไปจะทำให้ข้าวไม่สุก หรือข้าวแฉะ ทำการทดสอบคุณภาพการหุงต้มโดยทำการศึกษาระยะเวลาการหุงต้ม (minimum cooking time) และปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (% water intake) แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ข้าวขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะมีระยะเวลาที่ใช้ในการหุงต้มสั้นลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารปกติทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการทางความร้อนรูปแบบหนึ่ง ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วทำให้ข้าวขึ้นรูปเกิดการเจลลาคีในเซชันบางส่วน ซึ่ง Cheyne et al. (2005); Guha et al. (1998) และ Chinnaswamy and Hanna. (1988) รายงานว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะสามารถละลายและกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง และมีความสามารถในการดูดซับน้ำ (hydrate) ได้เร็วกว่าแป้งดิบตามธรรมชาติ ทำให้ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้ใช้เวลาในการหุงต้มสั้นลงในขณะที่ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารปกติ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มของข้าวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนแปลงไปจากการศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) จะสังเกตเห็นว่าข้าวขึ้นรูปสูญเสียลักษณะของเม็ดสตาร์ช มีลักษณะเป็นแป้งหลอมตัวอัดกันแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 4.3) ซึ่งลักษณะที่ปรากฏดังนี้ จะทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในเมล็ดได้ยากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดข้าวสารปกติ ต้องใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้นจึงจะทำให้ข้าวขึ้นรูปสุกพอดิ สัมพันธ์กับผลของค่า WAI (ตารางที่ 4.4) ที่พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่า WAI สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวขึ้นรูปสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าข้าวสารปกติ จึงทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (% water intake) ข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาทนอกจากนั้นเมื่อความชื้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการหุงต้มและปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มมีค่าเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับผลระดับการเกิดเจลลาคีในเซชันดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น (ตารางที่ 4.6) ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิ바เรลให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 4.8 ระยะเวลาการหุงต้ม ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม ของข้าวขึ้นรูป

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°C)	Minimum cooking time (min)	% water intake
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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.5.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่ศึกษา คือความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะ แสดงในตารางที่ 4.9 โดยพบว่าค่าความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะของข้าวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท ทั้งนี้ความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดข้าวขึ้นรูปที่ผ่านกระบวนการหุงต้ม เกิดจากการที่ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวขึ้นรูปสูญเสียโครงสร้างของเมล็ดที่มีตามธรรมชาติทำให้เมื่อทำการหุงต้ม ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวขึ้นรูปมีการละลายออกมาในน้ำที่ใช้ในการหุงต้มจึงทำให้ผิวของเมล็ดข้าวขึ้นรูปมีความเหนียว ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับค่า WAI (ตารางที่ 4.7) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมล็ดข้าวขึ้นรูป เป็นเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมาแล้วส่วนหนึ่ง เกิดการเจลาติไนเซชันแล้ว ข้าวขึ้นรูปมีลักษณะของเมล็ดข้าวที่เป็นเจลสตาร์ชที่ละลายน้ำได้ง่าย เมื่อผ่านกระบวนการหุงต้มจึงทำให้ผิวด้านนอกของเมล็ดที่มีลักษณะเป็นเจลสตาร์ชนี้ละลายออกมากับน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม ข้าวขึ้นรูปจึงมีความเหนียวมากกว่าข้าวสารปกติ ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการดูดซับน้ำที่วิเคราะห์ได้ (ตารางที่ 4.7) ทำให้เมล็ดข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่ได้มีความเหนียวมากกว่าเมล็ดข้าวสารปกติหุงสุกส่วนแรงกดอัดภายในภาชนะที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนแปลงไป โดยแป้งข้าวจะถูกทำให้ร้อน สุก และนวด ให้มีลักษณะเป็นโด (dough) ที่มีลักษณะคล้ายพลาสติกหยุ่นเหนียวภายในบาร์เรล แล้วอัดผ่านรูเปิดโดยใช้หน้าแปลนซึ่งได้รับการออกแบบมาให้มีรูปร่างเป็นเมล็ดข้าวออกมา และข้าวขึ้นรูปมีโครงสร้างภายในเป็นเนื้อเดียวกันที่อัดแน่นดังผลการศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) (รูปที่ 4.3) จึงทำให้ข้าวขึ้นรูปมีแรงกดอัดภายในภาชนะมากกว่าข้าวสารปกติ

การเพิ่มปริมาณความชื้นวัตถุดิบทำให้ค่าความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะมีค่าเพิ่มขึ้น ($p>0.05$) สัมพันธ์กับระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน (ตารางที่ 4.6) ความชื้นของวัตถุดิบที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับการเกิดเจลลาติไนเซชัน ดัชนีการดูดซับน้ำ และดัชนีการละลายน้ำสูงขึ้น ทำให้ค่าความเหนียวสูงขึ้นนอกจากนี้เมื่อปริมาณความชื้นของวัตถุดิบมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของแป้งข้าวซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในบารเรลดลง ทำให้ความต้านทานการหมุนของสกรูในบารเรลดต่ำ ค่าทอร์คจึงต่ำลงเจลดแป้งข้าวขึ้นรูปที่ออกสู่หน้าแปลนรูปเมล็ดข้าวจึงมีความแน่นมากขึ้น ส่งผลให้แรงกดอัดภายในภาชนะมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับผลการทดลองของรัตนาวดี ปัตตะเมฆ และคณะ (ม.ป.ป.) ที่ได้ทำการศึกษากการผลิตข้าวขึ้นรูปจากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่าความแน่นเนื้อของข้าวขึ้นรูปหุงสุกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับผลการทดลองของ Zhuang et al. (2009) ที่ทำการศึกษากผลของสภาวะการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวขึ้นรูปอินดิคาพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ความแข็งของเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบารเรให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 4.9 ค่าความเหนียวและแรงกดอัดภายในภาชนะของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

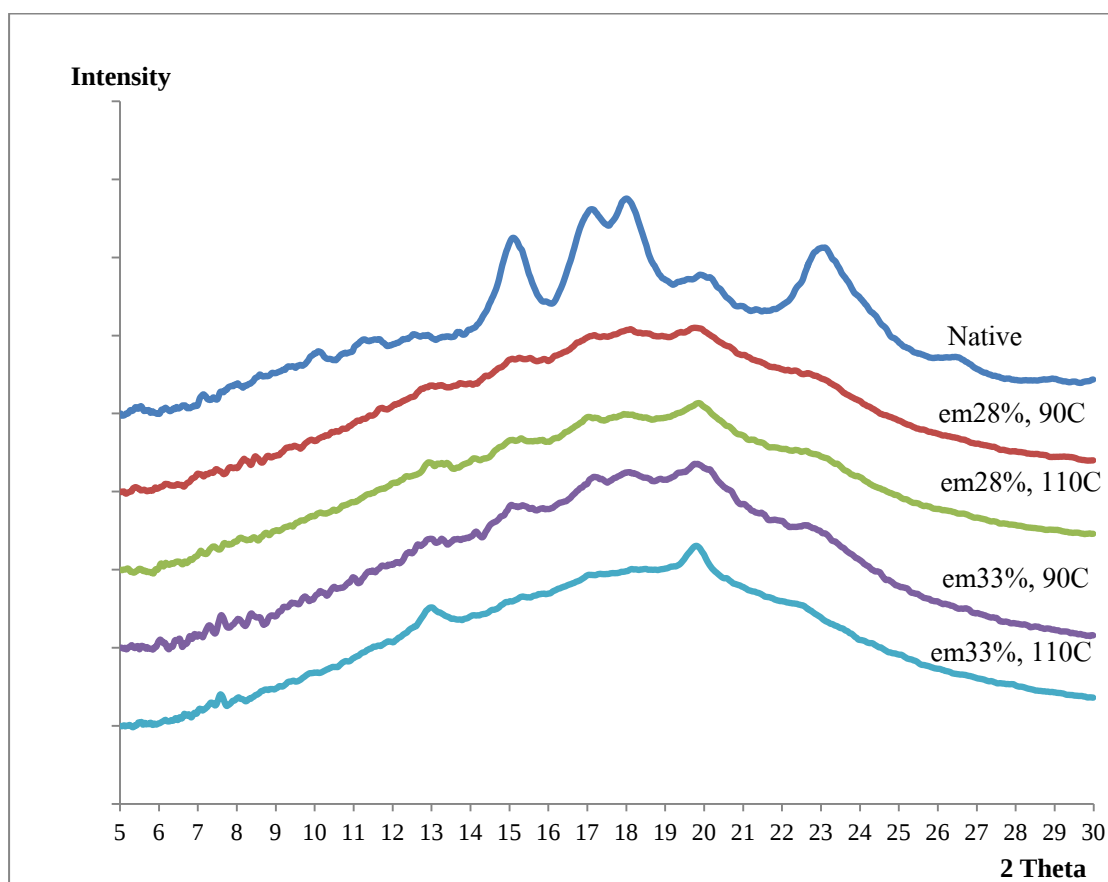
4.6 ลักษณะทางโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวขึ้นรูป

ลักษณะทางโครงสร้างผลึก (Crystallinity) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณารูปแบบผลึกของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทและแป้งข้าวขึ้นรูปจากการตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค Wide Angle x-ray Scattering (WAXS) พบว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทปรากฏพีกคู่ (doublet peak) ที่ 20 ที่ 17 และ 18° และพีกเดี่ยว (singlet peak) ที่ 20 ที่ 15 และ 23° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกชนิด A และเป็นลักษณะผลึกที่พบได้

ทั่วไปในแป้งจากธัญชาติ (Cheetham and Tao, 1998) ขณะที่แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะการผลิต em 28% + 90°C, em 28% + 110°C และ ที่สภาวะการผลิต em 33% + 90°C ปรากฏ singlet peak ที่ 20° ที่ 15 และ 23° ปรากฏ doublet peak ที่ตำแหน่ง 20° ที่ 17° และ 18° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ A นอกจากนี้ยังเห็นลักษณะของ singlet peak ที่ตำแหน่ง 20° ที่ 13, 19.7° ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) (Derycke et al., 2005) เนื่องจากแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ 0.65% ดังนั้นจึงสามารถรวมตัวกับอะมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวได้ในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่สภาวะการผลิต em 33% + 110°C ปรากฏ singlet peak ที่ 20° ที่ 13 และ 19.7° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบ V ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างผลึกจาก A เป็น A+V และ V

ตารางที่ 4.10 รูปแบบผลึก (Crystal pattern) ของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป

Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°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) ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนเซชันและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชัน หรือค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสคือค่าเอนทาลปี (ΔH) (Zobel et al., 1988) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชันสามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของแป้งได้ แป้งที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมาก มีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชันมากเนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการพอง สลายพันธะไฮโดรเจน ทำให้แป้งเกิดการเจลลาติไนเซชันนอกจากนี้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset

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

ผลการวิเคราะห์ T_o , T_p , T_c , ช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส ($T_c - T_o$) และ ΔH ของแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาทและแป้งข้าวขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท เกิดพิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนขึ้นในช่วง T_o ถึง T_c ที่ช่วงอุณหภูมิ $67.82 - 89.77^\circ\text{C}$ ซึ่งแสดงถึงช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งโดยจะมี $T_c - T_o$ ที่กว้างกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป (21.95°C) และมี ΔH สูงกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป (8.10 J/g) เนื่องจากโครงสร้างของแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาทมีโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกมากกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป แป้งจึงต้องใช้ปริมาณความร้อนมากกว่าเพื่อทำการสลายพันธะไฮโดรเจน และทำให้แป้งเกิดการเจลลาติไนเซชันแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่า T_o , T_c และ T_p สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท เนื่องจากแป้งข้าวขึ้นรูปเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complexes) ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V และแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยโครงสร้างผลึกที่ยังหลงเหลืออยู่นี้อาจเกิดการเหนียวทำให้เกิดผลึกขึ้นมาใหม่ ข้าวขึ้นรูปจึงมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A + V และ แบบ V จึงทำให้ค่า T_o , T_c และ T_p ของข้าวขึ้นรูปสูงกว่าข้าวพันธุ์ชยันนาทเมื่อพิจารณาจากค่า ΔH ของแป้งข้าวขึ้นรูปพบว่ามีค่าต่ำทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลึกที่เกิดขึ้นในข้าวขึ้นรูปมีปริมาณเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ค่า $T_c - T_o$ ของแป้งข้าวขึ้นรูปก็แคบกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท ซึ่งค่า $T_c - T_o$ ที่แคบกว่านี้แสดงให้เห็นว่าขนาดของผลึกมีความใกล้เคียงกัน ผลึกมีความ homogeneity สูงแต่ความเป็นผลึกต่ำจึงทำให้ค่า ΔH ของแป้งข้าวขึ้นรูปต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชยันนาท

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

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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

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

4.8 คุณสมบัติทางความหนืดของแป้งข้าวขึ้นรูป

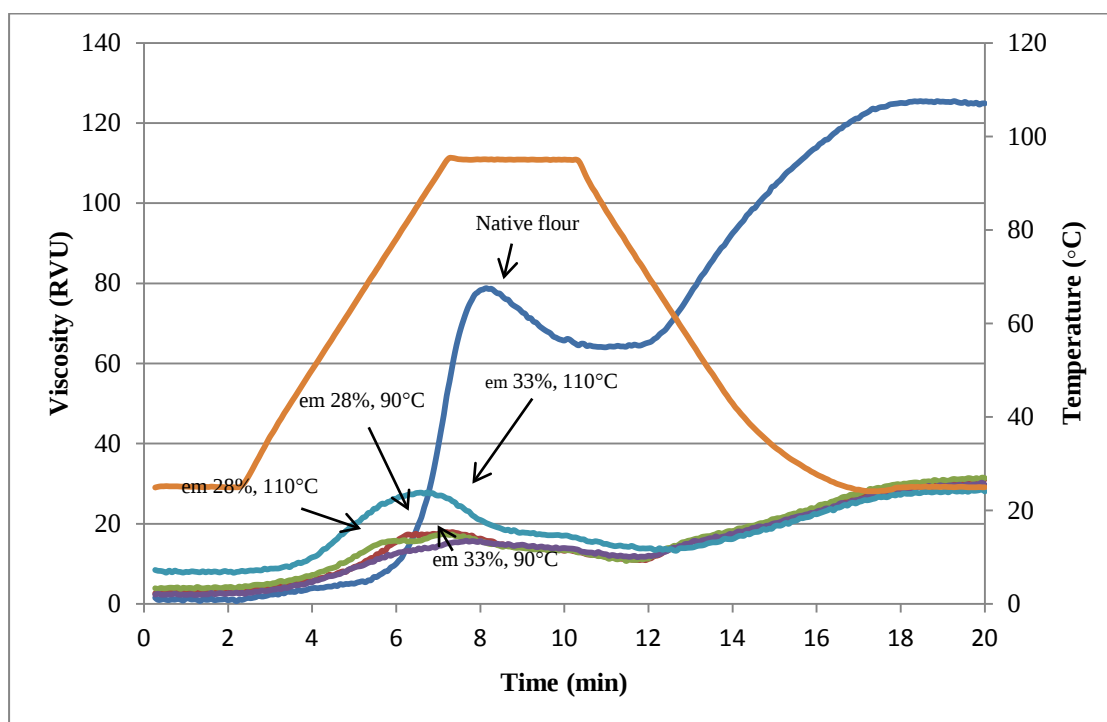
4.8.1 สมบัติการเกิดเพสท์

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA (Rapid visco analyzer) แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.12 โดยค่า Peak viscosity (PV), Peak time (PT), Setback (SB), Breakdown (BD) และ Final viscosity (FV) ของแป้งข้าวขึ้นรูปต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะถูกทำลายเนื่องมาจากการเสียดสีของแป้งกับผนังบารเรลและพลังงานความร้อนที่ได้รับ ดังนั้นจึงทำให้แป้งเกิดการเจลลาคีในเซชันดังกล่าว DG ที่สูงกว่าของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท (ตารางที่ 4.6) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hagenimana et al., (2006) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้รายงานว่าคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดแป้งข้าวเจ้ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งข้าวที่ไม่ผ่านการดัดแปร แป้งข้าวขึ้นรูปแสดงค่าความหนืดเริ่มต้น (initial paste viscosity, IPV) ที่อุณหภูมิเริ่มต้นการวิเคราะห์ (25°C) ในขณะที่แป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทไม่ปรากฏลักษณะดังกล่าว ทั้งนี้ Doublier et al., (1986) ได้ทำการศึกษาการให้ความร้อนด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันกับแป้งสาลีพบว่า เพสท์ของแป้งสาลีที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีพฤติกรรมทางความหนืดที่คล้ายคลึงกับของเหลว เนื่องมาจากการถูกทำลายของเม็ดแป้งอันเนื่องมาจากความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน การให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเกิดการเจลลาคีในเซชันที่สมบูรณ์จะทำให้ความหนืดของสารละลายแป้งลดลง (Schweizer, Reimann, Solms, Eliasson and Asp, 1986) ความหนืดของแป้งขึ้นกับระดับการแตกสลายของโมเลกุลสตาร์ช (E-dash et al., 2003) แป้งข้าวขึ้นรูปเกิดการเจลลาคีในเซชันบางส่วนจึงทำให้ค่า PV, PT, SB, BD และ FV ของแป้งข้าวขึ้นรูป

ต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ค่า PV คือค่าความหนืดสูงสุดของแป้งเมื่อเกิดการเจลลาคีในเซชัน ซึ่งได้รับผลกระทบจากสถานะต่าง ๆ ในกระบวนการแปรรูปรวมด้วย นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดแป้ง การหลุดออกของอะมิโลส ความเป็นผลึกของแป้ง ปริมาณอะมิโลส การกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพคติน และปริมาณของส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีในเม็ดแป้ง เช่น โปรตีน ไขมัน (Liu, Donner, Yin, Huang and Fan, 2006; Chuang, Liu, Pauls, Fan and Yada, 2008) ค่า PT แสดงถึงระยะเวลาที่แป้งแสดงค่าความหนืดสูงสุดแป้งข้าวขึ้นรูปผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว มีลักษณะเป็นแป้งพรีเจลลาคีในซีจึงทำให้ค่า PT ต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ค่า BD แสดงถึงความคงตัวของเพสต์ โดยแป้งที่มีค่า BD ต่ำ จะมีความคงตัวของเพสต์สูง ค่า SB แสดงถึงแนวโน้มของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้งเมื่อเพสต์แป้งสุกเย็นตัวลง สัมพันธ์กับค่าความคงตัวของเพสต์ค่า FV แสดงถึงความสามารถของแป้งที่จะสามารถเกิดเจลและความหนืด เมื่อเพสต์แป้งเย็นตัวลง (Lopeset al., 2012; Hagenimana et al., 2006)

ความหนืดที่เพิ่มขึ้นขณะให้ความร้อน (25 - 95°C) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดน้ำ และการพองตัวของแป้ง (Sandhu et al., 2007) ที่สภาวะการผลิต 33% mc + 110°C มีค่า Initial Paste Viscosity (IPV) และ PV สูงที่สุดซึ่งสัมพันธ์กับค่า DG และ WAI ที่มีค่าสูงสุด (ตารางที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่าแป้งที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะนี้มีสัดส่วนของสตาร์ชที่เกิดเจลลาคีในเซชันที่มากกว่า และสามารถกระจายตัวได้ในน้ำเย็นได้ดีกว่าจึงทำให้เกิดความหนืดในน้ำเย็นได้เนื่องจากเป็นสภาวะที่เม็ดสตาร์ชถูกทำลายไปมาก โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชและโมเลกุลของสตาร์ชส่วนใหญ่เกิดการเปิดออกและ โมเลกุลสตาร์ชหลุดออกจากเม็ดสตาร์ช มีผลให้โมเลกุลสตาร์ชสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น ทำให้สามารถละลายหรือกระจายตัวได้ในน้ำเย็น จึงทำให้เกิด IPV สูงสุดเมื่อเทียบกับแป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะการผลิตอื่น ๆ นอกจากนั้นการให้ความหนืดในเฟสต่อเนื่องของระบบที่สูงนี้ เนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์กับส่วนของสตาร์ชที่ไม่เกิดการเจลลาคีในซีที่มีอยู่ในระบบ จึงทำให้ PV ที่สภาวะการผลิตนี้ มีค่าสูงสุด

เมื่ออุณหภูมิของ RVA ลดลง จาก 95 -25°C ความหนืดของเพสต์แป้งจะมีค่ามากขึ้นเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลส และเกิดปฏิสัมพันธ์กันระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเพสต์แป้ง เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน (Kaur, Singh, Sodhi and Rana, 2009) และ ความหนืดของข้าวขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมินี้มีค่าน้อยกว่าความหนืดของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท เนื่องจากแป้งข้าวขึ้นรูปเกิดการเจลลาคีในเซชันบางส่วน โมเลกุลของสตาร์ชเกิดการแตกตัว ดังที่มีค่า WSI สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทถึง 3 เท่า ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของ RVA ลดลงสตาร์ชจึงมีความสามารถในการจัดเรียงตัวกันใหม่ต่ำ แป้งข้าวขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมินี้จึงมีค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท



รูปที่ 4.6 ลักษณะการเกิดเพสท์ของแป้งข้าวขึ้นรูป และ แป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA (Rapid visco analyzer) (em: extrusion moisture)

ตารางที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงทางความหนืดของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA (Rapid visco analyzer)

Extrusion conditions		Peak	Peak	Breakdown	Setback	Final	Initial
Extrusion moisture (%)	Barrel temperature (°C)	viscosity (RVU)	time (min)	nviscosity (RVU)	viscosity (RVU)	viscosity (RVU)	paste viscosity (RVU)
28	90	18.12 ^c	7.14 ^{ab}	7.25 ^b	20.25 ^b	31.11 ^b	2.62 ^{bc}
28	110	17.49 ^c	7.10 ^{ab}	6.79 ^b	20.70 ^b	31.40 ^b	3.91 ^b
33	90	15.99 ^c	8.00 ^a	4.49 ^b	18.18 ^b	29.68 ^b	2.33 ^{bc}
33	110	27.77 ^b	6.50 ^b	14.44 ^a	14.73 ^b	28.06 ^b	8.47 ^a
Native rice flour		78.80 ^a	8.13 ^a	14.83 ^a	60.94 ^a	124.91 ^a	1.54 ^c

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.8.2 พฤติกรรมการไหล

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท แสดงดังตารางที่ 4.13 จากการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน และอัตราการเฉือนของแป้งข้าว และแป้งข้าวขึ้นรูป พบว่าเป็นไปตามกฎสมการยกกำลัง (power law) แสดงดังสมการที่ 1

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n \quad (4.1)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นเฉือน (Pa)

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน (s^{-1})

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (consistency coefficient) ($Pa \cdot s^n$)

และ n คือ ดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหล (flow behavior index)

โดย $n = 1$, ของไหลมีคุณสมบัตินิวโตเนียน

$n > 1$, ของไหลมีคุณสมบัติ Shear thickening

$n < 1$, ของไหลมีคุณสมบัติ Shear thinning

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน และอัตราการเฉือนของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งข้าวขึ้นรูป พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปมีค่าดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหล (n) ต่ำกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทแต่มีค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) และ ค่าความหนืดปรากฏที่อัตราการเฉือน $100 s^{-1}$ (η_{100}) สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทสอดคล้องกับผลการทดลองของ Shiaun and Yeh (2004) ที่ทำการศึกษาคูณสมบัติทางวิทยากระแสของแป้งฟลาวร์ข้าวสาลีจากระบวนการเอกซ์ทรูชัน เนื่องมาจากแป้งข้าวขึ้นรูปผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วเกิดการเจลลาคีไนเซชันบางส่วน โครงสร้างของแป้งถูกทำลาย โมเลกุลสตาร์ชสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ดีดัง WAI ที่มีค่าสูงขึ้นทำให้สารละลายแป้งเกิดความหนืดได้ง่าย และเกิดความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ค่า n ต่ำ ค่า k และค่า η_{100} สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท เมื่อพิจารณาถึงค่าดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหลของแป้งข้าวขึ้นรูปแต่ละสภาวะการทดลองและแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท มีค่าเท่ากับ 0.48, 0.45, 0.56, 0.21 และ 0.62 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning (pseudoplastic) (Doublier, 1981)

การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบส่งผลให้ค่า η_{100} มีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิ $110^{\circ}C$ การเพิ่มอุณหภูมิบารเลส่งผลให้ ค่า n ลดลง แต่ค่า k และ η_{100} มีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีที่ความชื้นวัตถุดิบ 33% ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้น แป้งข้าวขึ้นรูปเกิดการเจลลาคีไนเซชันได้มากขึ้น ดังค่า DG ที่เพิ่มขึ้น สัดส่วนของแป้งที่เกิดการเจลลาคีไนเซชันมี

มากกว่าแป้งที่ไม่เกิดการเจลลาติไนซ์เช่นกัน เมื่อศึกษาผลของพฤติกรรมการไหล แป้งข้าวขึ้นรูปที่สถานะที่มีความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิอบสูงกวานี้ แป้งมีความเป็นเจล และมีโครงสร้างสามมิติของโครงข่ายเจลที่มากกว่า จึงทำให้สามารถจับกับน้ำได้ดีกว่า ดังค่า WAI เจลของแป้งข้าวขึ้นรูปที่สถานะการผลิตที่มีความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิอบสูงกวาจึงมีค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว และค่าความหนืดสูงกว่า ส่วนค่า n ของแป้งข้าวขึ้นรูปที่ลดลง เนื่องมาจากเจลของแป้งข้าวขึ้นรูปมีความหนืดสูง ทำให้เกิดการไหลได้น้อยกว่า จึงทำให้ค่า n มีค่าต่ำ

แป้งข้าวขึ้นรูปที่สถานะการผลิต $em33\% + 110^{\circ}C$ มีค่า n ต่ำที่สุดแต่มีค่า k และ η_{100} สูงที่สุดเนื่องมาจากสถานะการผลิตนี้เป็นสถานะการผลิตที่รุนแรงที่สุด สัดส่วนของแป้งเกิดการเจลลาติไนซ์เช่นมากที่สุดจากที่มี DG สูงสุด โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายไปมาก จึงทำให้ดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหลมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้แป้งที่สถานะการผลิตนี้มี WAI สูงที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติการเกิดเพสท์ โดยแป้งมีค่า IPV และ PV สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าแป้งที่สถานะการผลิตนี้สามารถดูดซับน้ำและเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำได้ดีที่สุด จึงส่งผลให้ค่า k และค่า η_{100} มีค่าสูงที่สุด

ตารางที่ 4.13 ค่า Flow behavior index (n), Consistency coefficient (k) Pa.sⁿ และ Apparent viscosity (η_{100}) ของแป้งข้าวขึ้นรูป และแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท

Sample	Flow behavior index (n)	Consistency coefficient (k) Pa.s ⁿ	Apparent viscosity (η_{100}) Pa.s
28% mc + 90°C	0.48 ^c	3.04 ^b	0.28 ^b
28% mc + 110°C	0.45 ^c	4.74 ^b	0.38 ^b
33% mc + 90°C	0.56 ^b	2.63 ^b	0.34 ^b
33% mc + 110°C	0.21 ^d	103.73 ^a	2.72 ^a
Native flour	0.62 ^a	1.12 ^b	0.19 ^b

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการแปรรูปข้าวขึ้นรูปโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีลักษณะปรากฏที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท สภาพะการผลิตที่มีความเหมาะสมที่สุดในการผลิตข้าวขึ้นรูป คือ สภาพะการผลิตที่ $em\ 28\% + 90^{\circ}C$ เนื่องจากเป็นสภาพะการผลิตที่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะปรากฏที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมากที่สุด และความหนืดของแป้งข้าวจนออกจากการบารมีมีความเหมาะสม ทำให้เมื่อทำการตัดด้วยใบมีดตัดแล้วได้เมล็ดข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะปรากฏเหมือนหรือคล้ายคลึงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาทมากที่สุด ส่วนสภาพะการผลิตที่ $em\ 33\% + 110^{\circ}C$ ไม่สามารถผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีความหนืดน้อยเกินไป ไม่สามารถตัดด้วยใบมีดตัดเพื่อผลิตให้มีลักษณะเป็นเมล็ดข้าวสารได้

ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้มีคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพแตกต่างจากข้าวสารพันธุ์ชัยนาทปกติ โดยข้าวขึ้นรูปเกิดเจลลาคีในเซชันบางส่วน ทำให้แป้งข้าวขึ้นรูปมีระดับการเกิดเจลลาคีในเซชัน (DG) ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) และ ดัชนีการละลายน้ำ (WSI) สูงกว่าแป้งข้าวสารพันธุ์ชัยนาท ทำให้ข้าวขึ้นรูปใช้ระยะเวลาในการหุงต้มสั้นลง แต่ใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า WAI ข้าวขึ้นรูปมีความเหนียว และความแน่นเนื้อมากกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท สัมพันธ์กับค่า WSI ข้าวขึ้นรูปสูญเสียโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยม แต่มีลักษณะเป็นเจลแป้งข้าวอัดแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้น้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ยากขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณน้ำในการหุงต้มมากขึ้น และทำให้ความแน่นเนื้อของข้าวขึ้นรูปมีค่ามากกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท ซึ่งสอดคล้องกับความแกร่งของเมล็ดข้าวขึ้นรูป (integrity) ที่มีค่าการสลายตัวในสารละลายเบสที่ระดับสูงกว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาทกระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้บางส่วนของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนรูป (transform) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบ V แต่ก็ยังเหลือลักษณะผลึกแบบ A อยู่บ้าง จึงแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A + V แต่สภาพะการผลิตที่ $em\ 33\% + 110^{\circ}C$ แป้งข้าวขึ้นรูปแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V (amylose-lipid complex) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทางความร้อนเนื่องจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของผลึกในแป้งส่งผลให้มีความคงทนต่อความร้อน จึงทำให้มีค่า T_o , T_p และ T_c สูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าแป้งข้าวขึ้นรูปที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A + V สอดคล้องกับสมบัติการเกิดเพสท์ที่พบว่าแป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาพะการผลิต $em\ 33\% + 110^{\circ}C$

มีค่า PV และ IPV สูงที่สุด สัมพันธ์กับผลของ DG และ WAI ที่มีค่ามากที่สุด แป้งที่มี DG สูงที่สุด สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโนกับไขมันได้ง่ายที่สุด ดูดซับน้ำได้ดีที่สุด เกิดความหนืดได้ในน้ำเย็น เกิดความหนืดได้ดีที่สุดและมีความคงทนต่อความร้อนมากที่สุด การศึกษาพฤติกรรมการไหลพบว่าทั้งแป้งข้าวขึ้นรูปและแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทมีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning โดยแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทมีค่า n น้อยกว่าแป้งข้าวขึ้นรูป แป้งข้าวขึ้นรูปที่สภาวะการผลิต $em\ 33\% + 110^{\circ}C$ มีค่าดัชนีแสดงพฤติกรรมการไหล (n) น้อยที่สุด แต่มีค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว (k) และ ค่าความหนืดปรากฏที่อัตราเฉือน $100\ S^{-1}(\eta_{100})$ มากที่สุด



รายการอ้างอิง

- กมลวรรณ แจ่มชัด. (2541). การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอกซตรูชัน. *อุตสาหกรรมเกษตร*. 9 (2): 4-8.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 292 หน้า.
- ข้าว. (2547). [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.ku.ac.th/e-magazine/february47/agri/rice.html>
- ชนิดา หันสวาสดี พิระศักดิ์ ฉายประสาท และปณทริกา รัตนตรัยวงศ์. (2548). *การแปรรูปผลิตภัณฑ์ข้าวพองกรอบ*. คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ชาญ มงคล. (2536). *ข้าว. ตำราเอกสารวิชาการฉบับที่ 63*. ภาพพัฒนาตำราและเอกสารวิชาการหน่วยการศึกษานิเทศ. กรมวิชาการฝึกหัดครู. กรุงเทพมหานคร. 43 หน้า.
- ประชา บุญญสิทธิกุล. (2537). *บทบาทของเอกซตรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย*. อาหาร. 26: 235-248.
- รัตนาวดี ปัตตะเมฆ 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 Ibave, 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. (1981). Rheological studies on starch-flow behavior of wheat starch pastes. **Starch/Starke.** 33: 415-420.
- 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.
- Kaur, S., Singh, N., Sodhi, N.S. and Rana, J.C. (2009). Diversity in properties of seed and flour of kidney bean germplasm. **J. Food Chem.** 117, 282–289.
- 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
- Liu, Q., Donner, E., Yin, Y., Huang, R.L. & Fan, M.Z. (2006). The physicochemical properties and in vitro digestibility of selected cereals, tubers and legumes grown in China. **J. Food Chem.** 99: 470–477.
- 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. Nisan 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.
- Schweizer, T.F., Reimann, S., Solms, J., Eliasson, A.C. and Asp, N.G. (1986). Influence of drum-drying and twinscrew extrusion cooking on wheat carbohydrates, II, Effect of lipids on physical properties, degradation and complex formation of starch in wheat flour. **J. Cereal Sci.** 4: 249–260.
- Shiaun, S.Y. and Yeh, A.I. (2004). On-line measurement of rheological properties of wheat flour extrudates with added oxido-reductants, acid and alkali. **J. Food Eng.** 62: 193-202.
- Singh, B., Sekhon, K.S. and Singh, N. (2007). Effects of moisture, temperature and level of pea grits 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

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบอุ่นสำหรับหาความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
3. อบอุ่นตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5-6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบกำหนดเวลา นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

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

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบอุ่นแก้วสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบลมร้อน ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ห่อหุ้มด้วยกระดาษและใส่ลงใน cellulose thimble คลุมด้วยใยแก้วหรือสำลีให้สารทำละลายมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
3. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต
4. เติมน้ำมันทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในขวดหาปริมาณไขมันประมาณ 150 มิลลิลิตร
5. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่น และเปิดสวิตช์ให้ความร้อน โดยใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง
6. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักด้วยแก้ว
7. คำนวณปริมาณไขมันจากสูตร

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

3. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาศกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อให้มิดชิดใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน
2. ใส่สารผสมคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใสปล่อยทิ้งให้เย็น
5. จัดอุปกรณ์การกลั่น แล้วเปิดสวิตช์ไฟ 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. ไตรเทรทสารละลายที่กลั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. ทำแบลนด์และปฏิบัติตามข้อ 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)



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุนทรี เจริญพร เป็นบุตรของ นายสืบสวัสดิ์ เจริญพร และนางดวงใจ เจริญพร เกิดเมื่อวันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2529 ที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนรักษาทรัพย์พิทยากร ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า กบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2550 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2551 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

