

องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของลูกเดี๋ยยและผลของ  
กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อคุณสมบัติทางเคมี  
และเคมีกายภาพของแป้งลูกเดี๋ยย

นางสาวจิราภรณ์ ชัยสิทธิ์เจริญกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2552

**CHEMICAL COMPOSITION AND STRUCTURE OF JOB'S  
TEAR AND EFFECT OF THERMAL PROCESSING ON  
CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES  
OF JOB'S TEAR FLOUR**

**Jiraporn Chaisiricharoenkul**

**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 2009**

องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของลูกเต๋อยและผลของกระบวนการแปรรูปด้วย  
ความร้อนต่อคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของแป้งลูกเต๋อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ปิยะวรรณ กาสลัก)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.สุนันทา ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.กนกอร อินทราพิเชฐ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ศิวดี ไทยอุดม)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(ผศ. ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)

คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

จิราภรณ์ ชัยศิริเจริญกุล : องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของลูกเดี๋ยและผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของแป้งลูกเดี๋ย (CHEMICAL COMPOSITION AND STRUCTURE OF JOB'S TEAR AND EFFECT OF THERMAL PROCESSING ON CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF JOB'S TEAR FLOUR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทาทองทา, 177 หน้า.

โครงสร้างของเมล็ดลูกเดี๋ยพันธุ์เปลือกขาวและดำ ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอและแบบส่องกราด มีรูปร่างของเมล็ดมีลักษณะค่อนข้างกลมและรี โดยส่วนของคัพภะถูกล้อมรอบด้วยส่วนเอนโดสเปิร์มและมีขนาดประมาณ 1 ใน 3 ของเมล็ด องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำที่บดแบบไม่แห้งแป้งที่แยกคัพภะออก และสตาร์ช พบว่า ปริมาณโปรตีนและไขมันของลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวมีปริมาณต่ำกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและไขมันในช่วงปริมาณ 13-17% และ 4.5-5.5% ปริมาณโปรตีนของแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกคัพภะออกไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch) 10-16% ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) 36-45% และปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) 39-52% ส่วน antioxidant properties ของแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำ พบว่า มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด DPPH radical scavenging activity reducing power และ coixenolide ในปริมาณ 7.33-8.18 mgGAE/g, 5.40-7.53%, 2.56-2.88 และ 0.02-0.53  $\mu\text{g/g}$  ตามลำดับ สตาร์ชลูกเดี๋ยแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A เมื่อตรวจสอบด้วย X-ray diffraction รูปร่างเม็ดสตาร์ชเป็นแบบกลม หลายเหลี่ยม ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 11.68-12.29 ไมครอน ขนาดของอะไมโลเพคตินของเฉลี่ยที่ degree of polymerization 20.78-21.01 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีนในเซชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยที่ศึกษาด้วย Differential Scanning Calorimetry มีค่า 63-82 องศาเซลเซียส การเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชใช้ระยะเวลา 39 วันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส คุณสมบัติการเกิดเพสทิวีเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่า ลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวให้ความหนืดสูงสุดและค่าเบรคดาวน์สูงกว่าพันธุ์ดำ กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว แต่ค่าการละลายของสตาร์ชพันธุ์ดำมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ขาว และให้ผลในทางตรงข้ามในแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกคัพภะออก

คุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ศึกษาที่ความชื้น 20%, 35%, 50% อุณหภูมิบารเลระดับต่ำ กลาง และสูง (90, 120, 150 องศาเซลเซียส) และความเร็วยอบสกรูที่ 150 รอบต่อนาที และกระบวนการอบโดเคลปที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส กระบวนการแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการมี



ผลทำให้ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index) ดัชนีการละลาย (water solubility index) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ SDS คุณสมบัติการเกิดเพสทิวีเคราะห์ด้วย RVA มีค่าลดลง แต่ปริมาณ RS ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป โครงสร้างกิ่งผลึกของแป้งลูกเดี๋ยยที่ทำการศึกษาคด้วย X-ray diffraction ถูกทำลายโดยกระบวนการแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการ สำหรับ antioxidant properties นั้น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ DPPH radical scavenging activity และ reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการมีค่าไม่แตกต่างจากแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ( $p>0.05$ ) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ coixenolide ขึ้นกับกระบวนการแปรรูปที่นำไปใช้ การศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยเอกซ์ทราซันและออโตเคลปต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ ที่ความชื้นของวัตถุดิบที่ 75% และอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส พบว่า การแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการให้ปริมาณสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ )

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร  
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

JIRAPORN CHAISIRICHAROENKUL : CHEMICAL COMPOSITION  
AND STRUCTURE OF JOB'S TEAR AND EFFECT OF THERMAL  
PROCESSING ON CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES  
OF JOB'S TEAR FLOUR. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA  
TONGTA, Ph.D., 177 PP.

STRUCTURE/JOB'S TEAR/EXTRUSION/AUTOCLAVE/STARCH FRACTIONS/  
ANTIOXIDANT PROPERTIES

The structure of Job's tear (Coix lachryma-jobi L.) grain, white husk and black husk, was studied using a stereo microscope and scanning electron microscope which showed that it was round and oval in shapes. The germ was entrapped in the endosperm and contained approximately one third of the whole grain. The whole grain flour was obtained from dry milling of polished Job's tear. The degermed flour was manually prepared and the starch was isolated from degermed flour. The protein and fat content of white husk Job's tear were greater than those of black husk Job's tear : 13-17% and 4.5-5.5% respectively. The protein content of whole grain flour and degermed flour was not significantly different ( $p>0.05$ ). The starch fractions of Job's tear, which included rapidly digested starch, slowly digested starch, resistant starch, yielded 10-16%, 36-45% and 39-52%, respectively. The antioxidant properties of Job's tear : total phenolic content, DPPH radical scavenging, reducing power and coixenolide generated 7.33-8.18 mgGAE/g, 5.40-7.53%, 2.56-2.88 and 0.02-0.53  $\mu\text{g/g}$ , respectively. The Job's tear starch exhibited an A-pattern of X-ray diffraction. A scanning electron micrograph showed that the Job's tear starch granules were round

and polygonal in shapes. The starch granule size of Job's tear was 11.68-12.29 micron. The average chain length of amylopectin of Job's tear was degree of polymerization 20.78-21.01. The gelatinization and retrogradation properties of Job's tear were monitored by Differential Scanning Calorimetry. The gelatinized temperatures of Job's tear were 63-82 °C. The retrogradation behavior of Job's tear occurred after storage for 39 days at 4 °C. From a Rapid Visco Analyzer, the peak viscosity and breakdown of white Job's tear were greater than those of black Job's tear. The swelling power of black Job's tear starch (BS) was higher than that of white Job's tear starch (WS) and the solubility of BS was lower than that of WS but the opposite results appeared in the whole flour and the degermed flour.

The effect of thermal processes, extrusion and autoclave, on the chemical and physicochemical properties of white husk Job's tear flour was studied. The extrusion parameters were the feed moisture of 20%, 35%, 50% and the barrel temperature of 90, 120, 150 °C with screw speed of 150 rpm and the autoclave times were 15, 30, 45 and 60 min at the temperature of 120 °C. As compared to the native Job's tear flour, the extrusion and autoclave processes increased water absorption index and water solubility index but decreased slowly digested starch and pasting profile. However, they did not significantly affect the resistant starch content. The extrusion and autoclave processing destroyed the semi-crystalline structure of Job's tear flour as investigated by X-ray diffraction. The antioxidant properties, total phenolic content, of the processed Job's tear flour decreased when compared to the native Job's tear flour. DPPH radical scavenging activity and reducing power of the processed Job's tear flour and the native Job's tear flour were not significantly different ( $p>0.05$ ). The coixenolide content depended on processing methods. The comparison between

extrusion and autoclave processes at the moisture content of 75 % and the temperature of 120 °C demonstrated that the starch fractions were not significantly different ( $p>0.05$ ).

School of Food Technology

Academic Year 2009

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทาทองทา และรองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร อินทราพิเชฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำสั่งสอน คำปรึกษา ตลอดจนช่วยชี้แนะให้ความช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดจนชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ นายวันชัย จอกระโทก และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 1, 2 และ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยแป้งมันสำปะหลัง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ในการให้ความสนับสนุนเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์สำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความสนับสนุนทุน สำหรับการศึกษาค้นคว้าขอขอบคุณสำนักประสานงานโครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนสำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่ที่ร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ ที่ให้กำเนิด ให้ความรัก การเลี้ยงดู การอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีเสมอมาและญาติ ๆ ทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จด้วยดี

จิราภรณ์ ชัยศิริเจริญกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายการอ้างอิง.....	4
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>9</b>
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลูกเดือย.....	9
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง.....	14
2.3 การแปรรูปด้วยความร้อน.....	23
2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอนุมูลอิสระและสารด้านการเกิดออกซิเดชัน.....	32
2.5 รายการอ้างอิง.....	37
<b>3 โครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมี</b>	
<b>และเคมีกายภาพของลูกเดือย.....</b>	<b>45</b>
3.1 บทคัดย่อ.....	45
3.2 บทนำ.....	46
3.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	49

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	57
3.4.1	โครงสร้างของเมล็ดลูกเดือย.....	57
3.4.2	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ.....	60
3.4.3	Antioxidant properties.....	64
3.4.4	คุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ด และแป้งลูกเดือยที่แยกสกัดออก.....	71
3.4.5	คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชลูกเดือย.....	79
3.5	บทสรุป.....	91
3.6	รายการอ้างอิง.....	92
<b>4</b>	<b>ผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อคุณสมบัติ ทางเคมีและเคมีกายภาพของแป้งลูกเดือย.....</b>	<b>101</b>
4.1	บทคัดย่อ.....	101
4.2	บทนำ.....	102
4.3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	104
4.4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	113
4.4.1	กระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	121
4.4.2	กระบวนการออโตเคลป.....	140
4.4.3	กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อชนิดของ สตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์.....	155
4.5	บทสรุป.....	156
4.6	รายการอ้างอิง.....	157
<b>5</b>	<b>สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>162</b>
	ภาคผนวก.....	164
	ประวัติผู้เขียน.....	177

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันไอ น้ำ และอุณหภูมิของเครื่องออโตเคลป.....31
2.2	เกณฑ์สำหรับพิจารณาเลือกวิธีการวิเคราะห์ดัชนีความสามารถในการต้านอนุมูล(TAC).....36
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ย ที่แยกคัพพะออกในพันธุ์ข้าวและดำ.....61
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชลูกเดี๋ย 2 พันธุ์.....63
3.4	ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ย ที่แยกคัพพะออกพันธุ์ข้าวและดำ.....71
3.5	คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและ แป้งลูกเดี๋ยที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์.....75
3.6	คุณสมบัติการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดพันธุ์ข้าวและดำ.....77
3.7	ปริมาณผลึกของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ.....79
3.8	ขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ.....80
3.9	การกระจายของขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน ของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ.....82
3.10	คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ.....87
3.11	คุณสมบัติการเกิดเจลลาคีโนเซชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ.....89
3.12	คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 39 วัน.....90
4.1	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ แรงทอร์คและความดันบริเวณหัว die.....114
4.2	ระดับการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการ เอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ.....116
4.3	สภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อชนิดของสตาร์ช ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์.....120
4.4	ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย.....127



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ปริมาณผลึกแป้งของลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	132
4.6 ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ย หลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	139
4.7 ผลของกระบวนการอโตเคลปต่อระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน.....	140
4.8 ผลของกระบวนการอโตเคลปต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์.....	141
4.9 ผลของกระบวนการอโตเคลปต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย.....	146
4.10 ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วย กระบวนการอโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที.....	154
4.11 ผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตรา การย่อยด้วยเอนไซม์.....	156
1ข รูปแบบการจัดเรียงสกรู(เริ่มจากส่วนที่ป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน).....	169
2ข รูปแบบของอนุหภูมิในแต่ละช่วงบารเลที่อนุหภูมิผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตต่าง ๆ.....	169
1ค คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วย กระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	171
2ค คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วย กระบวนการอโตเคลป.....	171
1ง ความแปรปรวน(analysis of variance) ของความชื้นและอนุหภูมิบารเล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน.....	172
2ง ความแปรปรวนของความชื้นและอนุหภูมิบารเล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว.....	172
3ง ความแปรปรวนของความชื้นและอนุหภูมิบารเล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า.....	173
4ง ความแปรปรวนของความชื้นและอนุหภูมิบารเล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์.....	173

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5ง	ความแปรปรวนของความถี่และอนุกรมบาเรล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำ.....175
6ง	ความแปรปรวนของความถี่และอนุกรมบาเรล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการละลาย.....175
7ง	สหสัมพันธ์(correlation) ของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....176
8ง	สหสัมพันธ์ของกระบวนการอโตเคลป.....176

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การจัดแบ่งทางพฤกษศาสตร์ของวงศ์ Gramineae.....	9
2.2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	15
2.3 แบบจำลองของอะไมโลเพคติน.....	16
2.4 ลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้ง.....	16
3.1 ลักษณะรูปร่างภายนอกของเมล็ดลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ.....	58
3.2 ภาพตัดขวางและภาพแนวยาวของเมล็ดลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ.....	58
3.3 ลักษณะโครงสร้างภายในของเมล็ดลูกเดือย 2 พันธุ์จากกล้อง SEM.....	59
3.4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extract ของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ.....	65
3.5 DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ.....	67
3.6 สมการการรับอะตอมไฮโดรเจนของอนุมูล DPPH• จากสารต้านอนุมูลอิสระ.....	68
3.7 reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ.....	69
3.8 โครงสร้างของสารประกอบ coixenolide.....	71
3.9 กำลังการพองตัวของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือย ที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์.....	73
3.10 ค่าการละลายของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือย ที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์.....	74
3.11 ลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกของลูกเดือยและข้าว.....	79
3.12 ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ ภายใต้กล้อง(SEM).....	80
3.13 การกระจายของขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ.....	81
3.14 การกระจายของขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ.....	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.15	กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ.....83
3.16	ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ.....86
4.1	ลักษณะปรากฏของแป้งลูกเด็ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 20%.....114
4.2	ลักษณะปรากฏของแป้งลูกเด็ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 35%.....115
4.3	ลักษณะปรากฏของแป้งลูกเด็ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 50%.....115
4.4	ผลของความชื้นของวัตถุดิบและโปรไฟล์ของอุณหภูมิ บารเรตต่อระดับการเกิดเจลลาทีนในเซชัน.....117
4.5	ผลของอุณหภูมิบารเรตต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ ของแป้งลูกเด็ยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....122
4.6	ผลของความชื้นของวัตถุดิบต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ ของแป้งลูกเด็ยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....124
4.7	ผลของความชื้นของวัตถุดิบและโปรไฟล์ของอุณหภูมิ บารเรตต่อดัชนีการดูดซับน้ำ.....128
4.8	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเด็ยที่ไม่ผ่านการ แปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและแป้งลูกเด็ยที่ ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....131
4.9	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts ของแป้งลูกเด็ย และเอกซ์ทรูเตตจากแป้งลูกเด็ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....134
4.10	DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของแป้งลูกเด็ย และเอกซ์ทรูเตตจากแป้งลูกเด็ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....136
4.11	reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของแป้งลูกเด็ย และเอกซ์ทรูเตตจากแป้งลูกเด็ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....138

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ผลของกระบวนการออกโตเคลปต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ ของแป้งลูกเดือยที่ระยะเวลาต่าง ๆ.....	144
4.13 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่าน การแปรรูปด้วยกระบวนการออกโตเคลป.....	148
4.14 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts จากแป้งลูกเดือยก่อน และหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออกโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที.....	149
4.15 DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts จากแป้งลูกเดือยก่อน และหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออกโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที.....	151
4.16 reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากแป้งลูกเดือย ก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออกโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที.....	153
1ก ลักษณะรูปร่างของเมล็ด ภาพแนวยาวและภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวสาลี.....	166
2ก ลักษณะรูปร่างของเมล็ด ภาพแนวยาวและภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวบาร์เลย์.....	166
3ก ลักษณะรูปร่างของเมล็ด ภาพแนวยาวและภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวโพด.....	167
4ก ลักษณะรูปร่างของเมล็ดและภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวฟ่าง.....	167

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ลูกเด็ยหรือเด็ย เป็นธัญชาติที่มีคุณค่าทางด้านโภชนาการและปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ สูงกว่าธัญชาติอื่น ๆ เช่น ปริมาณโปรตีนประมาณ 12-15% ไขมันประมาณ 5% สตาร์ช 50-60% ไฟเบอร์ 8-10% และเถ้า 2-3% (ศิริพร จันทนา, 2529) นอกจากนี้ยังมีปริมาณแร่ธาตุและวิตามินต่าง ๆ ในปริมาณที่สูงด้วย ความเชื่อสมัยโบราณของชาวจีนและญี่ปุ่นได้กล่าวไว้ว่า ลูกเด็ยเป็นอาหารเพื่อบำรุงสุขภาพ ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการนำลูกเด็ยทำเป็นเครื่องดื่มประเภทข้าวหมักชื่อว่า dzu ยาต้ม โจ๊ก สำหรับชงดื่มและใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับหมักทำเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และมีแนวโน้มที่จะนำลูกเด็ยมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ (health food) มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำลูกเด็ยมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อีกเช่น มิโซ (miso) ซึอิ้ว (soy sauce) แครกเกอร์ ขนมปัง บิสกิต และอื่น ๆ ซึ่งจากรายงานพบว่าปริมาณของการผลิตผลิตภัณฑ์จากลูกเด็ยมีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกปี (ศิริพร จันทนา, 2529) ประเทศศรีลังกาก็มีการนำลูกเด็ยมาใช้เป็นอาหารหลักแทนอาหารในกลุ่มข้าว (ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2531) จรัสพรรณ ต้นหยง (2544) ได้รายงานเกี่ยวกับ การวิจัยของนักวิทยาศาสตร์การแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบว่า ลูกเด็ยมีสารสำคัญหลายชนิดซึ่งออกฤทธิ์ทางยาต่อร่างกาย เช่น สาร coixol ที่สามารถคลายอาการเกร็งของกล้ามเนื้อ ลดความดันโลหิต ลดระดับน้ำตาลในกระแสโลหิต และลดอุณหภูมิของร่างกาย และยังมีสารประกอบที่ชื่อว่า coixenolide ที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้องอก (antineoplastic หรือ antitumor) กับป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง ส่วน Bao และคณะ (2005) พบว่า สารจำพวกไขมันธรรมชาติ (natural lipid) ที่สามารถสกัดได้จากส่วนของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) ด้วยอะซิโตน มีฤทธิ์ต้านการเกิดมะเร็งที่ตับอ่อนโดยเข้าไปยับยั้งในระดับยีน (gene) และยังมีสารประกอบในกลุ่มของโพลีฟีนอลิก (polyphenolic) ที่มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการเกิดริ้วรอย การเกิดออกซิเดชันที่อวัยวะต่าง ๆ และป้องกันการเริ่มต้นของการเกิดเนื้องอกเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชัน (Kuo และคณะ, 2002) นอกจากนี้คุณสมบัติด้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant properties) แล้ว ลูกเด็ยยังมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) ซึ่งสามารถทำให้มีปริมาณกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) เพิ่มขึ้นในลำไส้ใหญ่ (Chiang, Cheng, Chiang และ Chung, 2000) และยังช่วยลดปริมาณของไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดได้อีกด้วย (Tsai, Yang, Su และ Chen, 1998)

การแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารเพื่อให้ได้อาหารที่มีคุณภาพในการบริโภคตามความต้องการ ซึ่งการแปรรูปด้วยความร้อนเป็นวิธีการทำให้อาหารสุกและช่วยในการถนอมรักษาอาหารได้ด้วย แต่การแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนก็มีข้อเสียด้วย เช่น องค์ประกอบทางเคมีบางอย่างในอาหารถูกทำลาย ส่งผลให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลงการแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนกับอาหารมีหลากหลายวิธี โดยการเลือกวิธีการแปรรูปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการแปรรูปผลิตภัณฑ์นั้น ๆ รวมไปถึงความรุนแรงของการแปรรูปในแต่ละวิธี กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนแต่ละกระบวนการมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพต่าง ๆ รวมไปถึงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เช่น การเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ช (gelatinization) การสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีน (denaturation) การเกิดสารประกอบของอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complexes) เป็นต้น (Harper, 1981; Bhatnagar และ Hanna, 1994a; 1994b; Ilo, Liu และ Berghofer, 1999; Bhandari, D'Arcy และ Young, 2001) ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Vasanthan และคณะ (2002) ที่ทำการศึกษาผลจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณใยอาหารของแป้งข้าวบาร์เลย์พันธุ์ CDC-Candle (waxy) และพันธุ์ Pheonix (regular) พบว่า ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้ (soluble dietary fiber) และปริมาณใยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber) มีปริมาณเพิ่มขึ้นทั้ง 2 พันธุ์หลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันในช่วงอุณหภูมิ바เรลที่ 90-140 องศาเซลเซียสและช่วงความชื้นที่ 20-50% หรือในงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) ของ Kim และคณะ (2006) ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันในแป้งสาลีสำหรับทำเพสตรี (pastry wheat flour) พบว่า สถานะการทดลองที่ความชื้น 20 และ 40% ไม่มีผลต่อปริมาณ RS ยกเว้นที่ความชื้น 60% ของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณ RS Khalil และคณะ (1995) รายงานว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีผลให้ปริมาณกรดอะมิโนลิวซีน ทรีโอนีน และฮิสติดีนในพืชตระกูลถั่วชื่อเฟบา (feba bean) เพิ่มขึ้น และยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการย่อยของโปรตีนและค่า protein efficiency ratio (PER value) ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และกระบวนการนี้ก็มีผลทำให้ปริมาณแทนนิน สารยับยั้งทริปซิน (trypsin inhibitor) และ haemagglutinin activity มีค่าลดลงด้วย งานวิจัยของ Escarpa และคณะ (1996) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง RS ด้วยกระบวนการออโตเคลปแบบใช้ความดันสูงในสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่า กระบวนการใช้ความร้อนด้วยออโตเคลปแบบใช้ความดันสูงมีผลต่อปริมาณการสร้าง RS มากกว่าการแปรรูปด้วยการต้ม นอกจากนี้กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนยังมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบด้วย เช่น งานวิจัยของ Kadan และคณะ (2003) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับ คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน รายงานไว้ว่า คุณสมบัติของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันให้คุณสมบัติทางด้านเกิดการเกิดความหนืดและดัชนีการดูดซับไขมันของแป้งข้าว (fat absorption index) ที่

อุณหภูมิ 55 และ 99 องศาเซลเซียสมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) และดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) มีค่าเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Ding และคณะ (2005) ที่ได้ศึกษาถึง คุณสมบัติเชิงหน้าที่และทางกายภาพของแป้งข้าวสาลีหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน รายงานว่า WAI, WSI และอัตราการขยายตัว (expansion ratio) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับปัจจัยในด้านการผลิต เช่น ความชื้น อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate) และอุณหภูมิ바เรล งานวิจัยของ Chang และคณะ (1998) ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพในแป้งลูกเดี๋ย พบว่า กระบวนการออโตเคลป กระบวนการให้ความร้อนด้วยไอน้ำ (steaming) และกระบวนการต้ม (boiling) มีผลทำให้ WAI ค่ากำลังการพองตัว (swelling power) ระดับการเจลาทิไนเซชัน (degree of gelatinization) และเปอร์เซ็นต์การย่อย (%digestibility) ที่มีและไม่มีเอนไซม์เปปซินมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ WSI มีค่าลดลง

ในประเทศไทย การนำลูกเดี๋ยมาใช้ประโยชน์ยังมีค่อนข้างจำกัด เนื่องจากนิยมนำลูกเดี๋ยมาทำเป็นอาหารพื้นบ้าน ขนมหวานหรือเป็นส่วนประกอบของเครื่องของน้ำเต้าหู้ แต่ก็มีงานวิจัยในการนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การนำแป้งลูกเดี๋ยมาเป็นส่วนผสมในการผลิตเส้นขนมจีน (ศิริพร จันทนา, 2529) หรือการนำแป้งลูกเดี๋ยมาเป็นส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมสำเร็จรูป (จรัสพรรณ ดันหยง, 2544) ส่วนในปัจจุบันการแปรรูปลูกเดี๋ยที่นิยมมากได้แก่ การทำน้ำลูกเดี๋ย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตกันได้ง่าย โดยมีการผลิตตั้งแต่ระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งปัจจุบันได้มีการผลิตน้ำลูกเดี๋ยประเภทสเตรอไรด์ ยี่ห้อ Pro-Fit กับ P-life และได้นำมาเป็นส่วนผสมของน้ำนมถั่วเหลืองยี่ห้อ โพร โมสต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพหรืออาหารชีวจิต เช่น นำมาผสมในผลิตภัณฑ์ประเภท cereal bar ของ Fitme ชื่อ PIK'N'FIL และนำมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ประเภทโยเกิร์ต เช่น ในดัชชี ทูโทน และ CP-MEJI โยเกิร์ต เป็นต้น เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคตามกระแสอาหารชีวจิต ซึ่งองค์ความรู้ทางด้านโครงสร้างของเมล็ดลูกเดี๋ย องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และการนำกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนมาใช้ในลูกเดี๋ยรวมไปถึงผลของกระบวนการแปรรูป ของแป้งลูกเดี๋ยในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่อคุณสมบัติด้านการย่อยด้วยเอนไซม์ คุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพรวมไปถึงคุณสมบัติในการต้านการเกิดออกซิเดชันที่ยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัดและควรได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้เน้นการศึกษาถึงโครงสร้างของเมล็ดลูกเดี๋ย องค์ประกอบทางเคมี สมบัติการต้านการเกิดออกซิเดชัน และคุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของลูกเดี๋ยก่อนและหลังการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและกระบวนการออโตเคลป ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำลูกเดี๋ยมาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างทางสรีรวิทยาของเมล็ดลูกเดือยและตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของแป้งลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวและดำ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และอโตเคลปต่อการย่อยของสตาร์ช (starch digestion) และสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant)

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ส่วนสำคัญที่อยู่ในของเมล็ด เอนโดสเปิร์มของลูกเดือยมีสารต้านการเกิดออกซิเดชันและ RS กระบวนการแปรรูป อุณหภูมิและความชื้นของกระบวนการที่แตกต่างกันมีผลต่อการสร้าง RS และปริมาณสารต้านการเกิดออกซิเดชันในลูกเดือย

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาโครงสร้างของเมล็ดลูกเดือย องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวและดำ ศึกษากระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน คือ กระบวนการเอกซ์ทรูชันกับกระบวนการอโตเคลปที่มีผลต่อองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาว โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษา คือ ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ โปรไฟล์ของอุณหภูมิบารเลล ระยะเวลาการอโตเคลปในระหว่างกระบวนการแปรรูป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างทางสรีรวิทยาของเมล็ดลูกเดือย

1.5.2 ได้องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งลูกเดือย ซึ่งสามารถเป็นนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

1.5.3 ทราบถึงผลของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และอโตเคลปต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและการนำไปใช้ประโยชน์

## 1.6 รายการอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

- จรัสพรรณ ดันหยง. (2544). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอ้จ๊กข้าวกล้องผสมกิ่งสำเร็จรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน. (2530). ลูกเดือย : คุณสมบัติบางประการและผลิตภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2530). การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ  
ของแป้งและสตาร์ชลูกเดือย. *วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์.)* 21: 371-377.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2531). ผลิตภัณฑ์ลูกเดือย. *วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์.)*  
22: 103-109.
- นิธิยา รัตนพานนท์. (2535). *เคมีอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ.
- ศิริพร จันทนา. (2529). การใช้แป้งลูกเดือยในการทำนมจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต บัณฑิต  
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Aryee, F. N. A., Oduro, J., Ellis, W. O. and Afuakwa, J. J. (2006). The physicochemical properties  
of flour sample from the root of 31 varieties of cassava. *Food Control*. 17: 916-922.
- Bhandari, B., D'Arcy, B. and Young, G. (2001). Flavour retention during high temperature short  
time extrusion cooking process: a review. *Int. J. Food Sci. Tech.* 36: 453-461.
- Bhatnagar, S. and Hanna, M. (1994a). Amylose-lipid complex formation during single-screw  
extrusion of various corn starches. *Cereal Chem.* 71(6): 582-587.
- Bhatnagar, S. and Hanna, M. (1994b). Extrusion processing conditions for amylose-lipid  
complexing. *Cereal Chem.* 71(6): 587-593.
- Brouns, F., Kettlitz, B. and Arrigoni, E. (2002). Resistant starch and the butyrate revolution.  
*Trends Food Sci. Technol.* 13: 251-261.
- Cairns, P., Morris, V. J., Botham, R. L. and Ring, S. G. (1996). Physicochemical studies on resistant  
starch in vitro and in vivo. *J. Cereal Sci.* 23: 265-275
- Chang, H. C., Huang, Y. C. and Hung, W. C. (2003). Antiproliferative and chemopreventive effect of  
adlay seed on lung cancer in vitro and in vivo. *J. Agri. Food Chem.* 51: 3656-3660.
- Chang, S. M. and Chang, T. L. (1998). Effect of various thermal treatments on the physicochemical  
properties of adlay. *Bull. Inst.* 45: 55-65.
- Chiang, W., Cheng, C-H., Chiang, M-T., and Chung, K-T. (2000). Effects of dehulled adlay on  
the culture count of some microbiota and their metabolism in the gastrointestinal tract of  
rats. *J. Agric. Food Chem.* 48: 829-832.

- Chun, K. S., Chiang, W. and Kuo, M. L. (2004). Effect of adlay on azoxymethane-induced colon carcinogenesis in rats. **Food Chemical Toxic.** 42: 1339-1347.
- Goni, L., Garcia, L., Manas, E. and Calixto, F. S. (1996). Analysis of resistant starch: method for foods and food products. **Food Chem.** 56(4): 445-449.
- Hararumpu, S. G. (2000). Resistant starch-a review of physical properties and biological impact of RS<sub>3</sub>. **Carbohydr. Polym.** 41: 285-292.
- Harper, J. M. (1981). **Extrusion of food.** Vol. I. CRC Press. Florida.
- Hung, W. C. and Chang, H. C. (2003). Methanolic extract of adlay seed suppresses COX-2 expression of human lung cancer cells via Inhibition of gene transcription. **J. Agric. Food Chem.** 51: 7333-7337.
- Huth, M., Dongowski, G., Gebhardt, E. and Flamme, W. (2000). Functional properties of dietary fiber enriched extrudates from barley. **J. Cereal Sci.** 32: 115-128.
- Ilo, S., Liu, Y. and Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 32: 79-88.
- Jeong, S. M., Kim, S. Y., Kim, D. R., Nam, K. C., Ahn, D. U., and Lee, S. C. (2004a). Effect of seed roasting conditions on the antioxidant activity of defatted sesame meal extracts. **J. Food Sci.** 69: 377-381.
- Jeong, S. M., Kim, S. Y., Kim, D. R., Jo, S. C., Nam, K. C. and Ahn, D. U. (2004b). Effect of heat treatment on antioxidant activity of citrus peels. **J. Agri. Food Chem.** 52: 3389-3393.
- Kang, B-S., Kim, B-Y. and Hahm, Y-T. (2001). Optimization of the extrusion processing conditions for Job's tear. **Food Sci. Biotechnol.** 10(2): 123-127.
- Kim, J. H., Tanhehco, E. J. and Ng, P. K. W. (2006). Effect of extrusion conditions on resistant starch formation from pastry wheat flour. **Food Chem.** 99: 718-723.
- Kuo, C. C., Chang, W., Liu, G. P., Chen, Y. L., Chang, J. Y., Lee, C. K., Lo, J. M., Huang, S. L., Shih, M. C. and Kuo, Y. H. (2002). 2,2'-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical-scavenging active components from adlay (*Coix lachryma-jobi* L. Var. ma-yuen Stapf) hulls. **J. Agric. Food Chem.** 50: 5850-5855.
- Lee, S. C., Jeong, S. M., Kim, S. Y., Park, H. R., Nam, K. C. and Ahn, D. U. (2006). Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. **Food Chem.** 94: 489-493.

- Lehmann, U., Jacobasch, G. and Schmiedl, D. (2002). Characterization of resistant starch type III from banana (Musa acuminata). **J. Agric. Food Chem.** 50: 5236-5240.
- Li, J. and Corke, H. (1999). Physicochemical properties of normal and waxy Job's tears (Coix lachryma-jobi L.) starch. **Cereal Chem.** 76(3): 413-416.
- Niba, L. L. (2003). Effect of storage period and temperature on resistant starch and  $\beta$ -glucan content in cornbread. **Food Chem.** 83: 493-498.
- Nielsen, S. S. (1994). **Introduction to the chemical analysis of foods**. Boston: Jones and Bartlett Publishes.
- Numuta, M., Yamamoto, A., Moribayashi, A. and Yamada, H. 1994. Antitumor components isolated from the Chinese herbal medicine Coix lachryma-jobi L.. **Planta Med.** 60(4): 356-359.
- Ragaei, S., Abdel-Aal, E-S. M., and Noaman, M. (2005). Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. **Food Chem.** 98: 32-38.
- Rosin, P. M., Lajolo, F. M. and Menezes, E. W. (2002). Measurement and characterization of dietary starch. **J. Food Compos. Anal.** 15: 367-377.
- Prakash, A. (2001). Analytical progress antioxidant activity. **Medallion Laboratories.** 19: 1-6.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S. and Kulkarni, P. R. (2006). Resistant starch-a review. **CRFSFS** 5: 1-17.
- Schmidl, D., Baurelein, M., Bengs, H. and Jacobasch, G. (2000). Production of heat-stable, butyrogenic resistant starch. **Carbohydr. Polym.** 43: 183-193.
- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T. (1992). Antioxidant properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. **J. Agric Food Chem.** 40: 945-948.
- Siljeström, M., Westerlund, E., Björck, I., Holm, J., Asp, N-G. and Theander, O. (1986). The effects of thermal processes on dietary fibre and starch content of whole grain wheat and flour. **J. Cereal Sci.** 4: 315-323.
- Tsai, C. E., Yang, L., Su, P., and Chen, R. M-Y. (1998). Beneficial effect of adlay on plasma lipids in hamsters and hyperlipidemic and diabetic patients. **Atherosclerosis.** 136: Supplement 1.p.S43.

Tseng, Y. H., Yang, J. H., Chang, H. L., Lee, Y. L. and Mau, J. L. (2005). Antioxidant properties of methanolic extracts from monascai adlay. **Food Chem.** 97: 375-381.

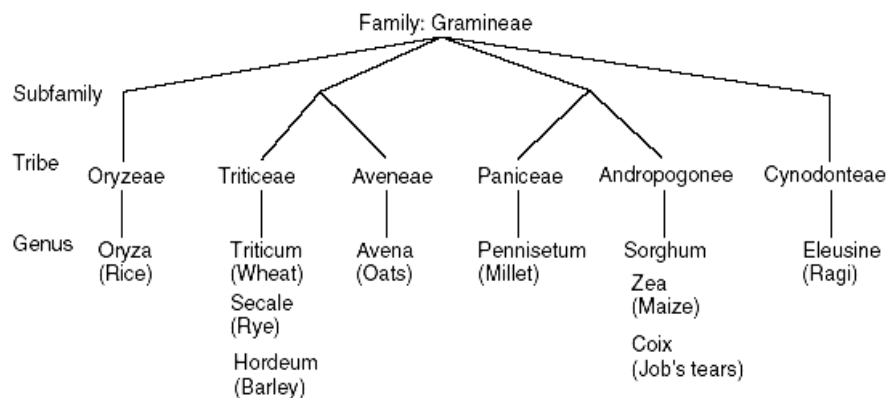
Yang, C-C., Chang, S-M. and Yan, H-Y. (1998). Adlay starch and its structure of amylopectin. **Bull. Inst. Chem.** 45: 67-78.

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลูกเดือย (*Coix lachryma-jobi* L.)

ลูกเดือยเป็นธัญพืชชนิดหนึ่งในวงศ์ (family) Gramineae/Poaceae ตระกูล (tribe) Andropogoneae สกุล (genus) *Coix* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Coix lachryma-jobi* L. var. *mayeun*. Stapf. และชื่อสามัญว่า Job's tears, coix, adlay, Chinese pearl barley และ hatomogi ซึ่งการเรียกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศ (Tseng, Yang, Chang, Lee และ Mau, 2006) ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ตามประวัติศาสตร์ของอินเดีย พบว่า ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่ปลูกโดยชาวอารยันในแถบเทือกเขาหิมาลัย ต่อมานักเดินทางชาวอาหรับได้เดินทางไปยังดินแดนตะวันตก ส่งผลให้ลูกเดือยได้รับการเผยแพร่ไปยังประเทศในแถบยุโรป ต่อมานายพลชาวจีน พบว่า ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่เจริญงอกงามดีจึงได้มีการนำกลับมาปลูกในประเทศจีนด้วย ส่งผลให้ลูกเดือยมีการเพาะปลูกทั้งในประเทศแถบเอเชียและยุโรป แต่โดยส่วนใหญ่นิยมเพาะปลูกในประเทศแถบเอเชียรวมทั้งประเทศไทยด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2543) จากข้อมูลทางพฤกษศาสตร์เรื่องวงศ์และตระกูลพบว่า ลูกเดือยมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับข้าวโพดและข้าวฟ่าง (ภาพที่ 2.1) (Encyclopedia Britannica, 1997)



ภาพที่ 2.1 การจัดแบ่งทางพฤกษศาสตร์ของวงศ์ Gramineae

ที่มา : Shewry, Tatham และ Kasarda (1992) อ้างถึงใน McKeivith (2004)

นอกจากนี้จากข้อมูลทางสัณฐานวิทยาของพืชสามารถแบ่งลักษณะ Coix lachryma-jobi L. ออกเป็น 4 ชนิดใหญ่ ๆ (Vacharotayan, Jan-orn, Cheaorn, Titatarn และ Kingkaew, 1982 อ้างถึงใน ทศนีย์ พรกิจประสาน, 2530) คือ

- 1) Coix lachryma-jobi L. var. “typical” Stapf : เมล็ดมีรูปร่างกลมรีคล้ายรูปไข่ เปลือกเมล็ดมีสีฟ้าอมขาว ผิวเมล็ดเรียบและแข็ง
- 2) Coix lachryma-jobi L. var. “stenocarpa” Stapf : เมล็ดมีรูปร่างกลมยาว เปลือกสีฟ้าอมขาว
- 3) Coix lachryma-jobi L. var. “monilifer” Stapf : เมล็ดมีรูปร่างกลมแบน และมีส่วนกว้างมากกว่าส่วนยาว เปลือกมีสีขาวขุ่นเหมือนน้ำมัน สีชมพู สีน้ำตาล สีดำ ขนาดเมล็ดมีตั้งแต่เล็กจนใหญ่สุด เมล็ดชนิดนี้ไม่นิยมนำมารับประทานแต่นิยมนำมาร้อยเป็นสร้อยคอ
- 4) Coix lachryma-jobi L. var. “ma-yuen” Stapf : เมล็ดมีลักษณะเป็นร่องตามแนวยาว เปลือกบางมาก มีสีขาวขุ่นถึงสีน้ำตาล สำหรับเมล็ดในสายพันธุ์นี้นิยมนำมาเพาะปลูกเพื่อนำมาบริโภค

สำหรับในประเทศไทย มีการเพาะปลูกลูกเดือย 3 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็นลูกเดือยพันธุ์พื้นเมืองหรือลูกเดือยหิน ซึ่งประเภทนี้ไม่สามารถนำมารับประทานได้เนื่องจากภายในเมล็ดมีปริมาณของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) น้อยและแข็ง ประเภทที่ 2 เป็นลูกเดือยเพาะปลูก ซึ่งเพาะปลูกมากทางภาคเหนือของประเทศไทย และนิยมรับประทานเฉพาะในท้องถิ่นเท่านั้น โดยลูกเดือยประเภทนี้มีรูปร่างเมล็ดกลมและขนาดใหญ่ประมาณ 10-12 มิลลิเมตร ลักษณะเปลือกค่อนข้างแข็งและมีสีน้ำตาลเทา ลูกเดือยประเภทนี้จะนำมารับประทานขณะเมล็ดอ่อนอาจนำมาต้มก่อนรับประทาน หรือรับประทานในรูปแบบสดก็ได้ ในบางครั้งลูกเดือยประเภทนี้สามารถเรียกได้อีกชื่อว่า “ลูกเดือยขบ” ประเภทสุดท้ายเป็นลูกเดือยทางการค้า เป็นลูกเดือยที่มีการเพาะปลูกอยู่ทั่วไปซึ่งจัดอยู่ในสายพันธุ์ Coix lachryma-jobi L. var. “ma-yuen” Stapf โดยมีลักษณะเป็นร่องตามแนวยาวคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวสาลี มีขนาดเมล็ดประมาณ 8-12 มิลลิเมตร ลักษณะเปลือกค่อนข้างบางมีสีตั้งแต่ขาวขุ่นจนถึงสีน้ำตาลทำให้สามารถแยกออกเป็นสายพันธุ์ต่าง ๆ ตามลักษณะของสีเปลือก (ทศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2531) นอกจากลักษณะของสีเปลือกแล้วยังสามารถแบ่งพันธุ์ของลูกเดือยทางการค้าได้ตามลักษณะรูปร่างเมล็ด ลำต้นและปริมาณอะไมโลสภายในเมล็ดได้เป็น 2 พันธุ์หลัก คือ ลูกเดือยข้าวเหนียว (glutinous type) และลูกเดือยข้าวเจ้า (nonglutinous type) (คำริ แยมสนรัตน์, 2503) ซึ่งเมล็ดลูกเดือยพันธุ์ข้าวเหนียวจะมีลักษณะกลม ตื้น และมีขนาดเมล็ดใหญ่กว่าลูกเดือยพันธุ์ข้าวเจ้า สำหรับเมล็ดลูกเดือยสายพันธุ์ข้าวเจ้ามีลักษณะเมล็ดค่อนข้างยาวและเล็ก

ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่สามารถนำมาบริโภคได้ทั้งในรูปแบบอาหาร และเป็นยาในการบำรุงสุขภาพ เนื่องจากลูกเดือยเป็นธัญพืชที่มีคุณค่าทางด้านโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่า

ข้าวฟ่างชนิดอื่น ๆ และเมื่อคิดเทียบต่อ 100 กรัมลูกเดี๋ยสามารถให้พลังงานได้ 380 แคลอรี ซึ่งในลูกเดี๋ยมีปริมาณโปรตีนประมาณ 15.4 กรัม ไขมัน 6.2 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 65.3 กรัม ไฟเบอร์ 0.8 กรัม และปริมาณเถ้า 1.9 กรัม นอกจากนี้ยังมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงถึง 435 มิลลิกรัม เพื่อช่วยบำรุงกระดูก แคลเซียม 25 มิลลิกรัม เหล็ก 5 กรัม และยังคงมีวิตามินต่าง ๆ อาทิเช่น ไนอาซิน 4.3 มิลลิกรัม วิตามินบี 1 0.28 มิลลิกรัมซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าในข้าวกล้อง วิตามินบี 2 0.19 มิลลิกรัม รองลงมาเป็นวิตามินเอ ช่วยบำรุงสายตา บำรุงธาตุ ใช้เป็นอาหารสำหรับคนไข้พักผ่อน ช่วยเจริญอาหาร รวมทั้งบำรุงเลือดลมในสตรีและหลังคลอด ช่วยรักษาอาการคลื่นไส้ อาเจียนและท้องร่วง (Duke, 1983) นอกเหนือจากนั้นในลูกเดี๋ยยังประกอบด้วยโปรตีนต่าง ๆ ซึ่งโปรตีนหลักในเมล็ดลูกเดี๋ยเป็นกลุ่มของโพรลามีน (prolamin) ที่เรียกว่า coixin ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและลิซีนสูง แต่มีไลซีนในปริมาณที่ต่ำ และยังมีโปรตีนอัลบูมิน (albumin) โกลบูลิน (globulin) และอนุพันธ์โปรตีนอื่น ๆ อีก ซึ่งโปรตีนต่าง ๆ เหล่านี้ในลูกเดี๋ยประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สูงเท่าความต้องการตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก เช่น มีกรดกลูตามิกในปริมาณมากตามด้วยลูซีน อลานีน โปรลีน วาลีน ฟินิลอลานีน ไอโซลูซีน และอาร์จินีนลดหลั่นลงมา โดยกรดอะมิโนเหล่านี้เป็นสารสำคัญที่ช่วยให้สามารถกลับได้ง่ายขึ้น เพราะกรดอะมิโนสามารถเข้าไปกระตุ้นให้เซลล์สมองหลั่งสารที่ทำให้เกิดการนอนหลับ (Ottoboni, Leite, Targon, Crozier และ Arruda, 1990) นอกจากนี้ในลูกเดี๋ยยังอุดมไปด้วยกรดไขมันจำเป็นชนิดที่ไม่อิ่มตัวด้วย เช่น กรดโอเลอิกและกรดลิโนเลอิก รวมแล้วมีปริมาณถึง 84% และประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัว คือ กรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกเพียง 16% เท่านั้น (เกตุอร ทองเครือ, 2547) จากองค์ประกอบทางเคมีเกี่ยวกับสารอาหารต่าง ๆ ในลูกเดี๋ยพบว่าสอดคล้องกับความเชื่อของชาวจีนและญี่ปุ่นตั้งแต่สมัยโบราณกาลที่กล่าวไว้ว่า ลูกเดี๋ยเป็นอาหารเพื่อบำรุงสุขภาพ สำหรับในประเทศญี่ปุ่นมีการนำลูกเดี๋ยมาเป็นเครื่องดื่มประเภทข้าวหมักและให้ชื่อว่า dzu นำมาทำเป็นยาต้ม เป็นโຈ็ก ชาสำหรับขงค้่มและใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อหมักสำหรับทำเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ โดยพบว่าในประเทศญี่ปุ่นมีแนวโน้มของการนำลูกเดี๋ยมาผลิตเป็นอาหารประเภทอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น เนื่องจากเป็นข้าวฟ่างที่มีอัลบูมินและไขมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูง นอกจากนี้ยังมีการนำลูกเดี๋ยมาผลิตเป็นมิโซ ซิวอิ้ว แครกเกอร์ ขนมปัง บิสกิต และอื่น ๆ อีกมากมาย และในประเทศจีนก็มีการนำมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพเช่นเดียวกับประเทศญี่ปุ่น (ศิริพร จันทนา, 2529) นอกเหนือจากประเทศจีนและญี่ปุ่นแล้วในประเทศศรีลังกาก็มีการนำลูกเดี๋ยมาใช้เป็นอาหารหลักแทนอาหารประเภทข้าว (ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอรนงค์ นัยวิกุล, 2531)

จากความนิยมในการนำลูกเดี๋ยมาใช้ จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ ในการศึกษาของศิริพร จันทนา (2529) ได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยเพื่อนำมาผลิตเป็นขนมจีน พบว่า แป้งลูกเดี๋ย (flour) ประกอบด้วยปริมาณโปรตีน 13.05% ไขมัน 5.45% คาร์โบไฮเดรต 68.60% ไฟเบอร์ 0.36% และเถ้า 1.3% และการศึกษา



ของทัศนีย์ พรกิจประสาน (2530) ซึ่งทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของแป้งและสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ผสมที่มีขายในท้องตลาด พบว่า ในแป้งลูกเด็ยมีปริมาณโปรตีน 14 -16% ไขมัน 5-6% เถ้า 1-2% เยื่อใย 0.2-0.3% คาร์โบไฮเดรต 77-78% และสตาร์ช 56-57% ส่วนสตาร์ชลูกเด็ยมีปริมาณโปรตีน 2.79% ไขมัน 0.78% เถ้า 0.29% อะไมโลส 10.85% และอะไมโลเพคติน 89.15% สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของแป้งและสตาร์ชลูกเด็ย พบว่า ความสามารถในการอุ้มน้ำและการละลายของแป้งมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเด็ย แต่สตาร์ชมีค่ากำลังการพองตัว ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันและความหนืดสูงกว่าในแป้งลูกเด็ย และการศึกษาของ Li และ Corke (1999) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพระหว่างสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวเจ้า 8 พันธุ์ พบว่า ปริมาณอะไมโลสของพันธุ์ข้าวเจ้าอยู่ในช่วง 15.9-25.8% และพันธุ์ข้าวเหนียวอยู่ในช่วง 0.7-1.1% กำลังการพองตัว (swelling power) และการละลาย (solubility) ของพันธุ์ข้าวเจ้ามีค่าต่ำกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว คุณสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ซึ่งวัดค่าต่าง ๆ ด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่า ค่าต่าง ๆ คือ peak temperature ( $T_p$ ), onset temperature ( $T_o$ ), completion temperature ( $T_c$ ), gelatinization range ( $T_r$ ) และค่า Enthalpy ( $\Delta H$ ) ในพันธุ์ข้าวเจ้ามีค่าใกล้เคียงกับพันธุ์ข้าวเหนียว ส่วนคุณสมบัติการเกิดเพสท์ (pasting properties) นั้นค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของพันธุ์ข้าวเจ้าและข้าวเหนียวมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน hot paste viscosity, cold paste viscosity และค่าเซตแบค (set back) ของพันธุ์ข้าวเจ้ามีค่าสูงกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว แต่มีค่าเบรคดาวน์ (breakdown) ต่ำกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว และคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเจล (gel textural properties) ซึ่งจะทำการวัดค่า hardness และค่า adhesiveness พบว่า ในพันธุ์ข้าวเจ้ามีค่า hardness สูงกว่า แต่มีค่า adhesiveness ต่ำกว่าพันธุ์ข้าวเหนียว

จากคุณค่าทางโภชนาการ คุณสมบัติทางกายภาพและการนำมาใช้ในลักษณะต่าง ๆ จึงได้มีการวิจัยค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อหาข้อมูลทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ของลูกเด็ย เช่น จรัสพรรณ ต้นหยง (2544) ได้รายงานเกี่ยวกับการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์การแพทยกรรมวิทยาศาสตร์การแพทย พบว่า ลูกเด็ยมีสารสำคัญหลายชนิดซึ่งออกฤทธิ์ทางยาต่อร่างกาย อาทิ เช่น สาร coixol ที่มีฤทธิ์สามารถคลายอาการเกร็งของกล้ามเนื้อ ลดความดันโลหิต ลดระดับน้ำตาลในกระแสโลหิต และลดอุณหภูมิของร่างกาย โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่น พบว่า ในรากของลูกเด็ยมีสาร coixol ที่ออกฤทธิ์แก้ปวดและขับปัสสาวะ และมีสารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า 1-methyl-2-(cis-9-hexadecenyloxy) propyl-trans-11-octadecenoate หรือเรียกสารนี้ว่า coixenolide มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้องอกและป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Bao และคณะ (2005) พบว่า ในลูกเด็ยมีสารจำพวกไขมันธรรมชาติ ที่สามารถสกัดได้จากส่วนของเอนโดสเปิร์มซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารต้านการเกิดมะเร็งที่ตับอ่อน

โดยสามารถเข้าไปยับยั้งการเกิดมะเร็งได้ถึงในระดับยีน และในประเทศจีนได้มีการนำส่วน neutral lipid มาใช้และตั้งชื่อให้ว่า “Kanglaite” มาใช้ในการรักษาผู้ป่วยจำนวน 270,000 คน พบว่า สารนี้ช่วยต้านการเจริญและฆ่าเซลล์มะเร็งและช่วยกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกัน เพื่อช่วยกำจัดเซลล์มะเร็ง ส่วน Numata, Yamamoto, Moribayashi และ Yamada (1994) พบว่า สารสกัดด้วยอะซิโตนที่ได้จากเมล็ดลูกเดือย ก็มีคุณสมบัติในการต้านการเจริญของเนื้องอกเช่นกัน นอกจากนี้สารสกัดด้วยอะซิโตนแล้ว สารสกัดจากลูกเดือยที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ ก็มีคุณสมบัติต้านการแบ่งตัวอย่างรวดเร็วของเซลล์ที่ผิดปกติ (anti-proliferative) ต้านการแสดงออกของสาร COX-2 ที่เป็นสาเหตุของการเกิดเซลล์มะเร็งในอวัยวะต่าง ๆ มีฤทธิ์ต้านการเจริญของเนื้องอก และมีคุณสมบัติลดปริมาณสารต้าน OVA IgE (anti-OVA IgE) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดภูมิแพ้ (allergic) ด้วย (Chang, Huang และ Hung, 2003; Hsu, Lin, Lin, Kuo และ Chaing, 2003; Hung และ Chang, 2003) รวมทั้งยังพบสารประกอบในกลุ่มของโพลีฟีนอลิกที่มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการเกิดริ้วรอย การเกิดออกซิเดชันที่อวัยวะต่าง ๆ และป้องกันการเริ่มต้นของการเกิดเนื้องอกเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิกที่พบที่สำคัญ อาทิเช่น coniferyl alcohol, syringic acid, ferulic acid, syringaresinol, 4-ketopinoresinol และพบลิแกนด์ (ligand) ใหม่จึงให้ชื่อว่า mayuenolide ตามชื่อของธาตุพืชที่พบ (Kuo และคณะ, 2002) และจากรายงานการวิจัยของ Nagoa, Otsuka, Kohda, Sato และ Yamasaki (1985) ยังพบว่า สาร benzoxazinones ที่สกัดได้จากเมล็ดลูกเดือยมีคุณสมบัติต้านการไหม้ของเซลล์ (anti-inflammatory) นอกจากนี้ยังพบสารในกลุ่ม coixan A, B และ C ในเมล็ดลูกเดือยซึ่งเป็นสารในกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) อย่างหนึ่งที่มีความสามารถช่วยลดปริมาณน้ำตาลในเลือด (hypoglycemic) (Takahashi, Konno และ Hikino, 1986) ซึ่งจากคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของลูกเดือยแล้ว ในส่วนของแอนโดสเปิร์มเป็นส่วนที่มีปริมาณมากที่สุดซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบในกลุ่มของโพลีแซคคาไรด์ โดยส่วนนี้นอกจากจะช่วยยับยั้งการเกิดมะเร็งแล้ว สารสกัดที่จากส่วนโพลีแซคคาไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (water-soluble polysaccharide) มีคุณสมบัติช่วยลดปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ปริมาณระดับคอเลสเตอรอลทั้งหมด (total cholesterol) และ low-density lipoprotein (LDL) คอเลสเตอรอลในสัตว์ทดลอง (Yu, Lu, Chiang และ Chiang 2005) และการศึกษาเพิ่มเติมของ Wu, Charles และ Huang (2007) พบว่า ในลูกเดือยยังมีสารสำคัญอีกกลุ่มหนึ่งที่มีคุณสมบัติช่วยลดปริมาณไขมันในกระแสเลือด คือ สาร policosanol (75-90 mg/kg) และ phytosterols (536-1,154 mg/kg) ซึ่งสาร policosanol เป็นสารที่ช่วยลดปริมาณระดับคอเลสเตอรอลทั้งหมดในร่างกายและลดปริมาณ LDL คอเลสเตอรอล ในทางตรงกันข้ามมีผลช่วยเพิ่มปริมาณ high-density lipoprotein (HDL) คอเลสเตอรอล สำหรับสาร phytosterols เป็นสารที่ช่วยลดการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดหัวใจ โดยปริมาณสาร phytosterols ที่พบมีปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับธัญพืชชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้คุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้น ยังพบว่า

ลูกเดี๋ยวยังมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกโดยจากรายงานการวิจัยของ Chiang และคณะ (2000) พบว่าการบริโภคลูกเดี๋ยวยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในลำไส้ และมีผลกระทบต่อทางเดินอาหาร (gastrointestinal tract) โดยมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มปริมาณกรดไขมันสายสั้นในลำไส้ใหญ่และอุจจาระให้มีปริมาณมากขึ้น โดยเฉพาะปริมาณกรดบิวทิริก (butyric acid) ด้วย และการศึกษาของ Lee, Lin, Cheng, Chiang และ Kuo (2008) เมื่อไม่นานนี้ พบว่า ในลูกเดี๋ยวยังมีสารสำคัญอีกกลุ่มหนึ่งที่สกัดได้จากส่วนของรำลูกเดี๋ยย ซึ่งสารที่สกัดได้มีฤทธิ์ช่วยยับยั้งการเกิดเซลล์มะเร็งในปอดและลำไส้ใหญ่ สารต่าง ๆ ที่สกัดได้มีการให้ชื่อว่า coixspirolactam A, coixspirolactam B, coixspirolactam C, coixlactam และ methyl dioxindole-3-acetate

นอกจากคุณสมบัติของลูกเดี๋ยยในการใช้ในด้านการรักษาโรคต่าง ๆ แล้ว จากการศึกษาวิจัยสมุนไพรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2524 พบว่า ลูกเดี๋ยยยังสามารถนำมาทำเป็นเครื่องสำอางค์ โดยมีฤทธิ์ทำให้การหมุนเวียนของเลือดที่ผิวหนังช่วยทำให้เส้นผมเจริญดีขึ้น และมีฤทธิ์แก้การอักเสบที่ผิวหนัง และได้รับการจดทะเบียนลิขสิทธิ์เครื่องสำอางค์ ซึ่งสอดคล้องกับความเชื่อของคนจีนที่ว่ากินเมล็ดเดี๋ยยทำให้ผิวสวย (ชัยโย ชัยชาญทิพยุทธ และคณะ, 2524)

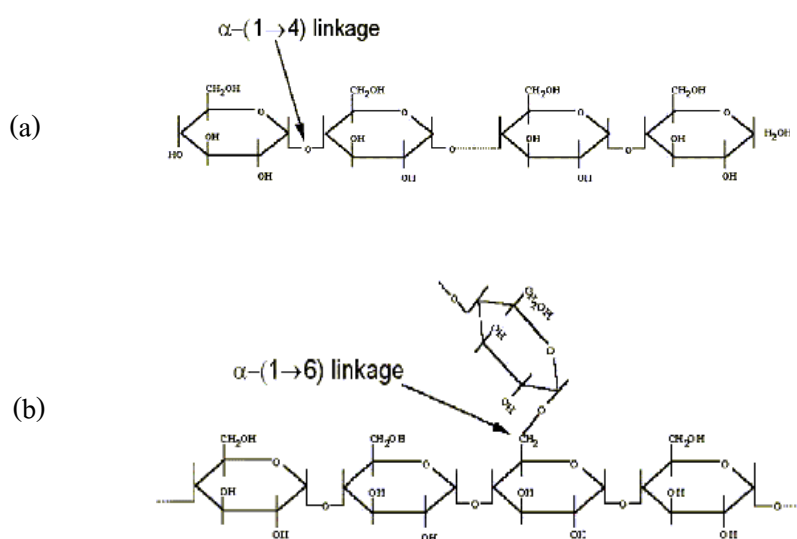
## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

สตาร์ช จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ที่พบมากที่สุดเ็นเอนโดสเปิร์มของธัญพืชประมาณร้อยละ 90 โดยโมเลกุลของสตาร์ชรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของธัญพืช เช่น ข้าว มีขนาดของเม็ดสตาร์ชประมาณ 3-5 ไมครอนและมีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม ข้าวโพดมีขนาดของเม็ดสตาร์ชประมาณ 5-25 ไมครอนและมีรูปร่างลักษณะกลมแบน มีหลายเหลี่ยม หรือในมันฝรั่ง จะมีขนาดของเม็ดสตาร์ชประมาณ 15-121 ไมครอนและมีรูปร่างลักษณะกลม รูปไข่มีลักษณะคล้ายเปลือกหอย เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวขนาดใหญ่ ซึ่งโดยส่วนใหญ่โครงสร้างของสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิดเป็นหลักคือ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน (ภาพที่ 2.2)

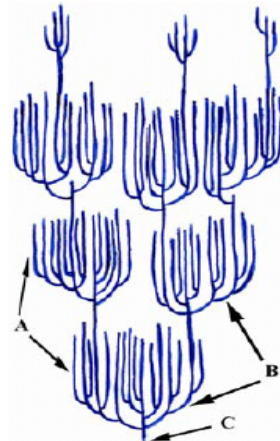
อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์สายตรง ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage ส่วนอะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสสายตรงขนาดสั้นที่มีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 10-60 หน่วย (degree of polymerization, DP = 10-60) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage และมีส่วนเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งก้านด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6 glycosidic linkage ซึ่งมีปริมาณ 5% ของปริมาณ glycosidic bond ทั้งหมด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) จากการศึกษาพบว่า มีการคิดค้นแบบจำลองของอะไมโลเพคตินไว้มากมายนับตั้งแต่ปี 1937 แต่ในปัจจุบันแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับ

คือ แบบจำลองของ Hizukuri (1986) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคติน ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ อีก 2 สายหรือมากกว่า สุดท้าย สาย C (C-chain) สำหรับสายนี้จัดเป็นสายแกนหลัก ซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ โดยโมเลกุลอะไมโลเพคติน แต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

โดยสายโซ่เหล่านี้เกาะรวมเป็นกลุ่มก้อนกันหรือเรียกว่า cluster ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า ส่วนผลึก (crystalline region) ที่เกิดจากส่วนของสายโซ่ที่เป็นเส้นตรงเรียงขนานกันมีความยาวของกลูโคสมากกว่า 10 หน่วยโมเลกุลสองสายเกิดพันธะไฮโดรเจนจัดเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นเกลียวคู่ (double helix) ในขณะที่บริเวณกิ่งที่เป็นพันธะ  $\alpha$ -1-6 glycosidic linkage ไม่สามารถเรียงตัวเป็นระเบียบได้ จึงเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า ส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ขึ้นส่งผลให้เม็ดแป้งหรือเม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) (ภาพที่ 2.4) (Jacobs และ Delcour, 1998)

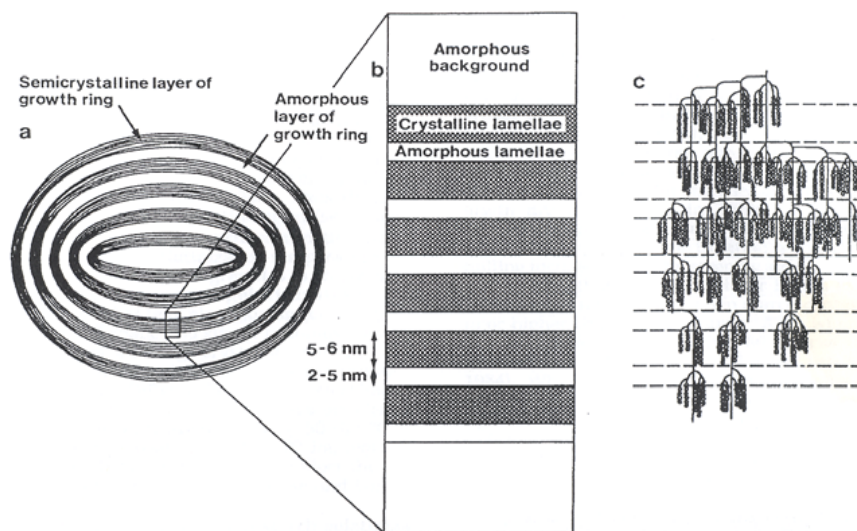


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ (a) อะไมโลส และ (b) อะไมโลเพคติน  
ที่มา: Ophardt (2003)



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองของอะไมโลเพกติน

ที่มา : Hizukuri, 1986



ภาพที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้ง

ที่มา : Jacobs และคณะ (1998)

สตาร์ชสามารถแบ่งตามอัตราการย่อยของสตาร์ช (rate of digestion) อัตราการปลดปล่อยกลูโคส (rate of glucose release) และการดูดซึมภายในทางเดินอาหารออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ แป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digest starch) แป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch) และแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch) (Englyst, Kingman และ Cummings, 1992; Zhang, Ao, และ

Hamaker, 2006; Zhang, Ao, และ Hamaker, 2008) โดยปริมาณของ RDS และ SDS ในผลิตภัณฑ์อาหารสามารถนำมาใช้ในการทำนายค่า glycemic index (GI) ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแป้งหรือสตาร์ชที่ได้จากธัญพืช ซึ่งค่า GI เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับการเพิ่มขึ้นในเลือดหลังรับประทานอาหารเทียบกับสารมาตรฐานกลูโคส (Zhang และคณะ, 2006)

### 2.2.1 แป้งย่อยได้เร็ว

แป้งย่อยได้เร็ว (rapidly digest starch, RDS) หมายถึง แป้งที่มีอัตราการย่อยของสตาร์ชและการปลดปล่อยกลูโคสมีอัตราการย่อยและปลดปล่อยกลูโคสที่เร็ว ทำให้ระดับกลูโคสในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับอาหารประเภทนี้จะอยู่ในกลุ่มอาหารที่ผ่านการปรุงสุกใหม่

### 2.2.2 แป้งที่สามารถย่อยได้ช้า

แป้งที่สามารถย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) หมายถึง แป้งที่มีอัตราการย่อยของสตาร์ชเป็นไปอย่างช้า ๆ แต่เป็นการย่อยที่สมบูรณ์ ทำให้อัตราการปลดปล่อยกลูโคสสู่กระแสเลือดอย่างช้า ๆ ซึ่งแป้งที่ย่อยได้ช้าในกลุ่มนี้มีค่า GI ต่ำ สำหรับสตาร์ชหรือแป้งจากธัญพืชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A มีการรายงานพบว่า มีปริมาณของ SDS สูง อย่างเช่น ในสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ปกติ (normal maize starch) มีปริมาณ SDS มากกว่า 50% เป็นต้น ในอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งที่ย่อยได้ช้าเป็นหลักนั้นให้ประโยชน์ต่อสุขภาพร่างกายหลากหลายและเหมาะกับผู้ป่วยที่มีโรคประจำตัวหรือโรคเรื้อรัง เช่น โรคเบาหวาน โรคอ้วน และโรคหัวใจ ซึ่งเกี่ยวข้องกับภาวะสมดุลของน้ำตาลกลูโคส (Zhang และคณะ, 2006)

จากงานการวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติการย่อยของสตาร์ช (in vitro digestibility) จากเนื้อเมล็ดของมะม่วง (mango kernel starch) พบว่า สตาร์ชจากมะม่วงมีโครงสร้างผลึกแบบ A และมีปริมาณ SDS ประมาณ 20% แต่มีปริมาณ RS สูงถึง 80% ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ SDS (45%) และ RS (27%) ในสตาร์ชข้าวโพดที่มีโครงสร้างผลึกในแบบเดียวกัน และในสตาร์ชมะม่วงมีค่า GI ประมาณ 50 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในสตาร์ชข้าวโพด (GI = 75) ซึ่งให้เห็นว่า สตาร์ชจากมะม่วงมีความสามารถในการต้านการย่อยด้วยเอนไซม์สูง ทำให้เห็นว่าปริมาณ SDS ไม่ได้มีผลมาจากโครงสร้างผลึกเพียงอย่างเดียว นอกจากโครงสร้างผลึกแบบ A จะมีปริมาณ SDS สูงแล้วในโครงสร้างผลึกแบบ C ที่เป็นการผสมผสานระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A และ B ก็มีปริมาณ SDS สูงเช่นกัน โดยจากการศึกษาคุณสมบัติด้านการย่อยของสตาร์ชในพืชตระกูลถั่ว พบว่า แป้งที่ได้จากพืชตระกูลถั่วมีปริมาณ SDS ต่ำ แต่มีปริมาณ RS สูงเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ได้จากพืชตระกูลถั่วชนิดเดียวกัน โดยสตาร์ชพืชตระกูลถั่วมีปริมาณ SDS สูง แต่ปริมาณ RS ต่ำ (Chung, Liu, Pauls, Fan และ Yada, 2008) นอกจากลักษณะพื้นฐานและ

โครงสร้างของัญพืชแล้วกระบวนการตัดแปรต่าง ๆ สามารถเพิ่มปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน เพื่อนำแป้งหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มาประยุกต์ใช้สำหรับผู้ที่เป็นโรคประจำตัวข้างต้นได้ อย่างเช่น งานวิจัยของ Han และ BeMiller (2007) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตัดแปรทางเคมีในสตาร์ชเพื่อเพิ่มปริมาณ SDS ในที่นี้ทำการตัดแปรในสตาร์ชจากข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียว พบว่า การตัดแปรทางเคมีด้วยวิธีการคลอสลิง (cross link) ร่วมกับวิธีการตัดแปรด้วย hydroxypropylation และ acetylation ให้ปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นมากกว่าการตัดแปรด้วยวิธีการคลอสลิงเพียงอย่างเดียว แต่ด้วยวิธีการตัดแปรทั้งหมดเหล่านี้ให้ปริมาณ SDS ที่มากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดแปร หรือในงานวิจัยของ Shin, Kim, Ha, Lee และ Moon (2005) ที่ทำการศึกษาการตัดแปรด้วยวิธีการตัดแปรทางกายภาพด้วยความร้อนขึ้นในสตาร์ชมันเทศ พบว่า การให้ความร้อนที่ 50% และความร้อนที่ 55 องศาเซลเซียสให้ปริมาณ SDS สูงกว่าการให้ความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิอื่น ๆ นอกจากนี้ การใช้เอนไซม์เพื่อทำการตัดกิ่งของอะไมโลเพคติน (debranch process) สามารถช่วยเพิ่มปริมาณ SDS ให้กับแป้งหรือสตาร์ชนั้น ๆ ได้ อาทิเช่น งานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตัดกิ่งในสตาร์ชข้าวฟ่างพันธุ์ข้าวเหนียวเพื่อเพิ่มปริมาณ SDS ในสตาร์ชข้าวฟ่าง พบว่า การตัดกิ่งด้วยเอนไซม์ไอโซอะไมเลสเป็นเวลา 8 ชั่วโมงและระยะเวลาการเก็บที่ 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วันให้มีปริมาณ SDS ในสตาร์ชข้าวฟ่างสูงที่สุด (27%) เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการตัดกิ่ง (7.1%) จึงเห็นได้ว่าการตัดกิ่งก้านของอะไมโลเพคตินช่วยเพิ่มปริมาณ SDS ได้ (Shin และคณะ, 2004) หรือในงานวิจัยของ Guraya, James และ Champagne (2001) ทำการศึกษาผลของการตัดกิ่งด้วยเอนไซม์พุลูลานาสในสตาร์ชข้าวเหนียว พบว่า การใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์สูงและระยะเวลาการย่อยที่สั้นสามารถให้ปริมาณ SDS สูงแต่เมื่อระยะเวลาการย่อยที่นานขึ้นส่งผลให้ปริมาณ RS สูงขึ้น

### 2.2.3 แป้งทนย่อยต่อเอนไซม์

แป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (enzyme-resistant starch หรือ resistant starch, RS) จัดเป็นการตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification) โดยตามคำนิยามของ European FLAIR-concerted Action on Resistant starch (EURESTA) หมายถึง แป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์และดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ปกติได้ จากคุณสมบัติที่สำคัญของ RS ซึ่งไม่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ภายในลำไส้เล็ก เพราะฉะนั้น RS จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายและการหมุนเวียนของโลหิต โดย RS ที่ไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กและผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่แล้วก็จะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ กลายเป็นกรดไขมันสายสั้น ๆ อาทิเช่น แอซีเตท โพรพิโอเนท บิวทิเรท และมีก๊าซเกิดขึ้นร่วมด้วย ซึ่งกรดไขมันที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไปตามชนิดของ RS และกรดไขมันสายสั้นนี้สามารถดูดซึมภายในลำไส้ใหญ่และขนส่งไปถึงตับได้ กรดไขมันที่เกิดขึ้นนี้

สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (pathogenic microorganisms) เพิ่มปริมาณของของเหลวและปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) จากรายงานการวิจัย พบว่า กรดบิวทิเรทที่สร้างขึ้นมาเข้าไปช่วยในการปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติ (transformed cell) ในสิ่งมีชีวิต ดังนั้นกรดบิวทิเรทที่สร้างขึ้นนี้มีความสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งในลำไส้ได้ (Kim, Tanhehco และ Ng, 2006) นอกจากนี้การบริโภค RS หรือเส้นใยอาหาร ยังมีส่วนช่วยป้องกันหรือลดภาวะโรคอ้วน และมีบทบาทในการลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในหลอดเลือด โรคหัวใจและโรคเบาหวานอีกด้วย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) RS สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติแต่มีปริมาณที่น้อย ซึ่งการเกิดขึ้นเกิดจากการที่เม็ดแป้งถูกห่อหุ้มอยู่ในร่างแหของโปรตีนหรือถูกตรึงอยู่ในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดแป้งได้ แต่โดยส่วนใหญ่ RS ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมมาจากกระบวนการดัดแปรแป้งด้วยวิธีการต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้

RS สามารถแบ่งได้ตามนิยามของ Brouns, Kettlitz และ Arrigoni (2002); Themeier, Hollmann, Neese และ Lindhauer (2005); Thompson (2000); Sajilata, Singhal และ Kulkarni (2006) ออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1) RS Type 1, Physically inaccessible starch เป็น RS ที่อยู่ในเมล็ดพืช เกิดจากเม็ดแป้งถูกตรึง หรือโดนโอบล้อมอยู่ในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช มีผลทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเม็ดแป้งได้ สำหรับ RS ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่สามารถพบได้ในเมล็ด (grain และ seeds) และถั่ว (legume)

2) RS Type 2, Ungelatinized granules เป็น RS ที่อยู่ในรูปของเม็ดแป้งดิบ (native granular starch) และมีรูปแบบ polymorphic จากการตรวจวัดด้วย X-Ray diffraction อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ B หรือ C ซึ่งในกลุ่มนี้จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ได้อย่างช้า ๆ หรือไม่สมบูรณ์ และในกลุ่มนี้สามารถพบได้ในสตาρχต่าง ๆ อาทิเช่น แป้งมันฝรั่ง (raw potato starch) กล้วยดิบ (green banana) กลุ่มของถั่ว (pea) หรือข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (high amylo maize starch)

3) RS Type 3, Retrograded starch เป็นกลุ่มของ RS ที่เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน หรือเรียกว่า กระบวนการเกิด recrystallization ของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ซึ่งอะไมโลสสามารถเกิดกระบวนการคืนตัวได้ดีกว่าอะไมโลเพคติน สำหรับในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่สามารถพบได้ในสตาρχหรือแป้งที่ผ่านกระบวนการทำให้สุกและลดอุณหภูมิลง เพื่อให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ อย่างเช่น มันฝรั่งที่ผ่านกระบวนการทำให้สุก ในขนมปัง และคอร์นเฟลค



4) RS Type 4, Chemically modified starch เป็นกลุ่มของ RS ที่เพิ่งได้รับการนิยามและจัดแบ่งประเภทขึ้นมาใหม่ ซึ่งเป็น RS ที่เกิดจากกระบวนการดัดแปรแป้งทางเคมีต่าง ๆ อาทิเช่น แป้งดัดแปรด้วยกระบวนการครอสลิง (cross linking starch) เป็นต้น

จากการที่ RS type 1-3 สามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติได้เองมีปริมาณน้อย ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการผลิตแป้งและสตาร์ชเพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่เรียกว่า RS โดยเฉพาะ RS type 3 ซึ่งเป็นประเภทที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็น RS ที่มีความเสถียรต่อความร้อน (thermal stability) สามารถทนต่อความร้อนเนื่องจากกระบวนการแปรรูปในอุตสาหกรรมได้ (Haralumpu, 2002) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการผลิตรกรดไขมันสายสั้น (total short chain fatty acid) จาก RS type 2 และ type 3 พบว่า RS type 3 ที่ถูกหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ในช่วงระยะเวลาสั้น สามารถผลิตรกรดบิวทริกได้ในปริมาณสูงกว่า RS type 2 โดยกรดบิวทริกที่เกิดขึ้นนี้มีประโยชน์ต่อร่างกายดังที่กล่าวมาข้างต้น (Brouns, Kettlitz และ Arrigoni, 2002) ดังนั้น RS type 3 จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของอาหาร เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารและคุณค่าทางโภชนาการด้านอื่น ๆ นอกจากนี้ จากหลายรายงานการวิจัยพบว่า ในระหว่างกระบวนการแปรรูปสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS ได้ เนื่องจากปริมาณ RS ที่เกิดขึ้นได้รับอิทธิพลมาจากสภาวะการแปรรูป อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ รวมทั้งการให้ความร้อนซ้ำ (re-heating) เช่น การเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ และเป็นระยะเวลานานของการศึกษาของ Faraj, Vasanthan และ Hoover (2004) พบว่า แป้งบาร์เลย์หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process) ที่เก็บแล้วพบว่าช่วยเพิ่มปริมาณ RS type 3 ได้

จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการผลิต RS ของ Kim, Tanhehco และ Ng (2006) ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันในแป้งสาลีสำหรับทำเพสตรี (pastry wheat flour) พบว่า สภาวะการทดลองที่ความชื้น 20 และ 40% ไม่มีผลต่อปริมาณ RS ยกเว้นที่ความชื้น 60% ของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณ RS เนื่องจากเป็นช่วงระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการรีโทรเกรดชัน และผลของความเร็วยรอบสกรู (screw speed) พบว่า ไม่มีผลต่อปริมาณ RS แต่เมื่อนำเพสตรีที่ได้เก็บที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณ RS ดังนั้น ความชื้นและเวลาในการเก็บจึงส่งผลต่อการสร้าง RS จากการศึกษผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้งบาร์เลย์พันธุ์ CDC-Candle และพันธุ์ Pheonix ของ Faraj และคณะ (2004) พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการแปรรูปที่อุณหภูมิ 90, 100, 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ความชื้นของวัตถุดิบที่ 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วยรอบสกรูที่ 60, 80 และ 110 รอบต่อนาที ไม่ได้ทำให้ปริมาณ RS type 3 ลดลงเมื่อเทียบกับ native flour แต่เมื่อนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสก่อนการอบจะช่วยเพิ่มปริมาณ RS type ซึ่งคณะผู้วิจัยได้สรุปไว้ว่าสภาวะในการทดลองนี้ไม่เหมาะสมต่อการสร้าง RS type 3 แต่การสร้าง

RS ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเก็บ ส่วนรายงานการวิจัยของ Siljström และคณะ (1986) พบว่า กระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้ปริมาณ RS ลดลงแต่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยอาหารในแป้งสาลี Huth, Dongowski, Gebhardt และ Flamme (1999) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของแป้งข้าวบาร์เลย์หลังผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า สภาพของกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสส่งผลให้เกิดการสร้าง RS ได้สูงกว่าที่สภาวะการทดลองอื่น ๆ และช่วงอุณหภูมิการเก็บที่ -18 องศาเซลเซียสในช่วงระยะเวลาสั้นส่งผลให้เกิดการสร้าง RS เพิ่มขึ้น ดังนั้น การสร้าง RS ในข้าวบาร์เลย์เป็นผลมาจากทั้งกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและสภาวะการเก็บ และรายงานการวิจัยเพิ่มเติมที่สนับสนุนเกี่ยวกับผลของสภาวะการเก็บมีผลมากกว่าผลของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณ RS คือ Chanvrier และคณะ (2007) ที่พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้ปริมาณ RS ลดลง และการเก็บหลังผ่านการแปรรูปที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการเก็บที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส งานวิจัยของ Dust และคณะ (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสภาวะของการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อองค์ประกอบทางเคมีของส่วนประกอบต่าง ๆ ในอาหาร (food ingredients) พบว่า สภาวะการทดลองที่เลือกใช้ คือ อุณหภูมิช่วง 80-90 องศาเซลเซียส ช่วยเพิ่มปริมาณ RS ในรำข้าวโอ๊ตและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ใน barley grit และ cornmeal มีปริมาณ RS ลดลง และในสภาวะอุณหภูมิเดียวกันนี้ยังช่วยเพิ่มปริมาณใยอาหารที่ละลายได้ (soluble dietary fiber) ใน barley grit และเพิ่มปริมาณใยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber) ใน cornmeal กับรำข้าวโอ๊ต ส่วนปริมาณใยอาหารที่ละลายไม่ได้ (insoluble dietary fiber) มีค่าลดลงทั้งใน barley grit cornmeal และรำข้าวโอ๊ต

นอกจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อการสร้าง RS กระบวนการให้ความร้อนอื่น ๆ ก็มีผลเช่นกัน เช่น การทำให้สุกด้วยไอน้ำ (steam cooking) และการให้ความร้อนด้วยกระบวนการออโตคลอป (autoclave process) เป็นต้น งานวิจัยของ Tovar และ Melito ในปี 1996 ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำให้สุกด้วยไอน้ำและการทำแห้งต่อการสร้าง RS ในพืชตระกูลถั่ว พบว่า การทำให้สุกด้วยไอน้ำและการทำแห้งส่งผลให้เกิดการสร้าง RS เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแปรรูป นอกจากนี้กระบวนการออโตคลอปเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีผลต่อการสร้าง RS งานวิจัยของ Escarpa, González, Mañas, Diz และ Calixto (1996) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง RS ด้วยกระบวนการออโตคลอปแบบใช้ความดันสูง (high-pressure autoclave process) ในสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่า กระบวนการให้ความร้อนด้วยออโตคลอปแบบใช้ความดันสูง มีผลต่อปริมาณการสร้าง RS มากกว่าการแปรรูปด้วยการต้ม (boiling water bath) Niba และ Hoffman (2003) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการออโตคลอปต่อปริมาณ RS ของข้าวฟ่าง พบว่า การออโตคลอปที่อุณหภูมิ 120

องศาเซลเซียสมีผลทำให้ปริมาณ RS ลดลงน้อยกว่าการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการออโตเคลปมีผลทำให้ปริมาณ RS ลดลงเมื่อเทียบกับข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการออโตเคลป นอกเหนือจากนี้เมื่อนำข้าวฟ่างมาผ่านกระบวนการแช่เมล็ดก่อน พบว่ากระบวนการแช่มีส่วนช่วยทำให้ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Siljestrom และ Asp (1985) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง RS ในสตาร์ชข้าวสาลีด้วยกระบวนการออโตเคลป พบว่า หลังผ่านกระบวนการออโตเคลปแล้วสตาร์ชข้าวสาลีมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นเป็น 9% เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวสาลีที่ไม่ผ่านกระบวนการออโตเคลปที่มีปริมาณ RS น้อยกว่า 1% นอกจากนี้การให้ความร้อนซ้ำยังมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณ RS ด้วย งานวิจัยของ Bjorck และคณะ (1987) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการออโตเคลปในสตาร์ชข้าวสาลีด้วยวิธีการให้ความร้อนซ้ำ (reboiling/ cooling) เป็นจำนวน 3 รอบ พบว่า ปริมาณ RS ในสตาร์ชข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6.2 เป็น 7.8% ต่อนักนักแห่ง Szczodrak และ Pomeranz (1991) ได้ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนซ้ำด้วยกระบวนการออโตเคลปในสตาร์ชข้าวบาร์เลย์ พบว่า จำนวนการให้ความร้อนซ้ำ (autoclaving/cooling) ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 20 รอบ ส่งผลให้ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6% เป็น 26% เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sievert และ Pomeranz (1989) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนซ้ำด้วยกระบวนการออโตเคลปในสตาร์ช amylo maize VII พบว่า การให้ความร้อนซ้ำถึง 20 รอบสามารถเพิ่มปริมาณ RS ได้มากกว่า 40% แต่การให้ความร้อนซ้ำด้วยกระบวนการออโตเคลปไม่ได้มีผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นเสมอไป โดยงานวิจัยของ Skrabanja และ Kreft (1998) ได้ทำการศึกษากระบวนการให้ความร้อนซ้ำด้วยกระบวนการออโตเคลปและระยะเวลาในการเก็บของ buckwheat ซึ่งพบว่า กระบวนการให้ความร้อนซ้ำด้วยกระบวนการออโตเคลปและระยะเวลาในการเก็บไม่มีผลต่อปริมาณ SDS และ RS นอกจากการให้ความร้อนซ้ำแล้วยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง RS ด้วยกระบวนการออโตเคลปร่วมกับวิธีการอื่น เช่น การตัดกิ่ง (debranched) ในงานวิจัยของ Soto, Acevedo, Feria, Villalobos และ Pérez (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง RS จากสตาร์ชกล้วยด้วยกระบวนการออโตเคลปร่วมกับการตัดกิ่ง (debranching) พบว่า หลังจากให้ความร้อนด้วยกระบวนการออโตเคลปและย่อยด้วย เอนไซม์พูลูลานาส (pullulanase) ส่งผลให้ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า นอกจากการนำกระบวนการออโตเคลปทำงานร่วมกับการตัดกิ่งด้วยการใช้เอนไซม์แล้วยังสามารถนำการให้ความร้อนด้วยกระบวนการออโตเคลปมาใช้ร่วมกับกระบวนการย่อยด้วยกรดซึ่งมีผลต่อการสร้าง RS ในสตาร์ชกล้วยด้วยเช่นกัน งานวิจัยของ Saguilán และคณะ (2005) พบว่า การย่อยด้วยกรดเพียงขั้นตอนเดียวในสตาร์ชกล้วย ส่งผลให้ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.51% เป็น 2.61% แต่เมื่อนำสตาร์ชกล้วยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดมาให้ความร้อนด้วยกระบวนการออโตเคลป พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณ RS ของสตาร์ชกล้วยได้เป็น 19.34% โดยการให้ความร้อนด้วยกระบวนการออโตเคลปอย่างเดียวก็สามารถทำให้ปริมาณ RS ในสตาร์ชกล้วยเพิ่มขึ้นจาก 1.51% เป็น 16.02% นอกจากนี้

การเก็บหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตเคลปก็มีส่วนเพิ่มปริมาณ RS ด้วย งานวิจัยของ Onyango, Bley, Jacob, Henle และ Rohm (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มต่อการสร้าง RS type 3 หลังผ่านกระบวนการอโตเคลปของสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าระยะเวลาและอุณหภูมิในการบ่มที่เพิ่มขึ้นหลังผ่านกระบวนการอโตเคลปทำให้ปริมาณ RS type 3 มีค่าเพิ่มขึ้น และระยะเวลาในการอโตเคลปที่ระยะเวลา 15 และ 45 นาทีมีผลให้ปริมาณ RS type 3 มีค่าสูงที่สุด Soto, Escobedo, Sánchez, Rivera และ Pérez (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของระยะเวลาและอุณหภูมิการเก็บหลังผ่านกระบวนการอโตเคลปรวมกับการตัดกิ่งในสตาร์ชกล้วย พบว่าอุณหภูมิการเก็บที่ 4 และ 32 องศาเซลเซียสของเจลสตาร์ชกล้วยให้ปริมาณ RS สูงกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเก็บที่ 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อปริมาณ RS

### 2.3 การแปรรูปด้วยความร้อน

การแปรรูปด้วยความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญที่สุดในกระบวนการแปรรูปอาหารเพื่อให้ได้อาหารที่มีคุณภาพในการบริโภคตามความต้องการ ซึ่งการให้ความร้อนนอกจากจะเป็นวิธีการทำให้อาหารสุกแล้วยังช่วยในการถนอมรักษาอาหารได้ด้วย โดยการใช้ความร้อนมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อยับยั้งการเน่าเสียของอาหาร ช่วยกำจัดหรือลดจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อร่างกายและยังช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในอาหาร นอกจากนี้การให้ความร้อนยังมีประโยชน์ที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ การเกิดเจลของแป้ง การปลดปล่อยในอะซิน การเปลี่ยนสี กลิ่น รส และเนื้อสัมผัส และการเพิ่มความสามารถในการย่อยขององค์ประกอบในอาหาร อย่างเช่น การใช้ความร้อนช่วยปรับปรุงความสามารถในการย่อยโปรตีน ในขณะที่เดียวกันการแปรรูปด้วยความร้อนยังมีข้อเสียด้วยเช่นกัน เช่น การทำลายองค์ประกอบบางอย่างในอาหารซึ่งทำให้คุณค่าทางโภชนาการลดลงไป

การแปรรูปด้วยความร้อนกับอาหารมีหลากหลายวิธี ซึ่งในการเลือกวิธีการแปรรูปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการแปรรูปผลิตภัณฑ์นั้น ๆ รวมไปถึงความรุนแรงของการแปรรูปด้วยความร้อนของแต่ละวิธี อย่างเช่น การแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความรุนแรงของการแปรรูป (mild process) สามารถเลือกวิธีการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยวิธีการลวกหรือการพาสเจอร์ไรซ์ ซึ่งเป็นวิธีการแปรรูปที่ทำให้คุณภาพของอาหารหรือผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ถ้าการแปรรูปผลิตภัณฑ์นั้นต้องการแปรรูปด้วยความร้อนที่มีความรุนแรงมากขึ้น ก็สามารถเลือกการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยวิธีการอบ การย่าง และการทอด เป็นต้น ซึ่งการแปรรูปด้วยวิธีเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะผลิตภัณฑ์มากกว่าการถนอมรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ สามารถนำการแปรรูปด้วยความร้อนทั้ง 2 ระดับความรุนแรงนี้ร่วมกับกระบวนการแปรรูปอื่น ๆ ได้ด้วย เช่น การแช่เยือกแข็งหรือการแช่เย็น และการบรรจุ เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของ

ผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าผลิตภัณฑ์ต้องการยืดอายุการเก็บรักษาโดยอาศัยการแปรรูปด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจำเป็นต้องแปรรูปผลิตภัณฑ์นั้นในสภาวะการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยวิธีการแปรรูปที่รุนแรงมากขึ้นไป เช่น การสเตอริไลซ์ (sterilization) และ การแปรรูปด้วยความร้อนจากหม้อนึ่งอัดความดันหรือเรียกว่า กระบวนการอโตเคลป เป็นต้น นอกเหนือจากนั้น ในบางกรณีต้องการแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายทั้งในเรื่องรูปร่าง สี กลิ่นและรส รวมทั้งยังมีวัตถุประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์นั้นสุกโดยใช้เวลาในการแปรรูปที่สั้น พร้อมทั้งช่วยยืดอายุการเก็บรักษาด้วย ซึ่งกระบวนการแปรรูปที่สามารถตอบสนองวัตถุประสงค์นี้ได้ คือ กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (วิลโลว์ริงสาตทอง, 2545)

### 2.3.1 การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process) เป็นกระบวนการแปรรูปที่รวมหลากหลาย ๆ วิธีการแปรรูปเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การนวด การเนียน การขึ้นรูป เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1797 วิศวกรชาวอังกฤษชื่อ Joseph Bramah ได้ริเริ่มประดิษฐ์เครื่องเอกซ์ทรูดขึ้นแบบขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรม การทำท่อตะกั่วแบบไร้รอยตะเข็บ และได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งหลังจากการพัฒนาให้ประสิทธิภาพแล้วจึงนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก จากนั้นในราวกลางปี ค.ศ.1930 ได้มีการนำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นครั้งแรก โดยนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า พาสตา จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ต่อจากนั้นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ก็ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น และนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายรูปแบบจน ถึงปัจจุบัน ซึ่งวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของแป้งเป็นหลัก สำหรับประเทศไทย คาดว่าได้มีการนำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มาใช้ในปี พ.ศ. 2512 ที่มีชื่อเรียกว่า “collet extruder” ซึ่งเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีขนาดเล็ก ง่ายต่อการดำเนินการ ราคาถูก ประหยัด และสามารถนำมาใช้ทำอาหารที่สุกพองได้ง่าย เช่น อาหารขบเคี้ยวหรือขนมอบกรอบที่ผลิตมาจากวัตถุดิบพวกปลายข้าว และข้าวโพดหยาบ (corn grit) (ประชา บุญญสิริกุล, 2537 และ Riaz, 2000)

กระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นกระบวนการแปรรูปที่ใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น (high temperature short time) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่างแรงทางกลและความร้อน (วิลโลว์ริงสาตทอง, 2545) โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้รวมหลากหลายการทำงานของหลากหลายส่วนไว้ร่วมกัน ได้แก่ ส่วนที่รับและส่งวัตถุดิบ (feed hopper) เข้าสู่ตัวเครื่อง ส่วนการผสม การนวด การเนียน การให้ความร้อน และการขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านรูเปิดที่หน้าแปลน เพื่อทำให้เกิดรูปร่าง ส่งผลทำให้วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (intermediate product) หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (finished product) ซึ่งในปัจจุบัน กระบวนการเอกซ์ทรูชันได้นำมาใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด เช่น อาหาร

พร้อมรับประทานจากธัญชาติ (ready-to-eat cereal) เนื้อเทียม พาสตา และอาหารขบเคี้ยว (snack) เป็นต้น (ประชา บุญญศิริกุล, 2539)

### 2.3.1.1 หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

กมลวรรณ แจ่มชัด (2541) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ไว้ว่า “เมื่อวัตถุดิบถูกเติมลงไปยังส่วนรับวัตถุดิบ จากนั้นวัตถุดิบจะถูกส่งผ่านไปยังตัวเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ อันดับแรก วัตถุดิบจะได้รับการผสมแล้วเกิดการหลอมเหลวอยู่ภายในที่ให้คุณสมบัติคล้ายกับพลาสติก อันเนื่องมาจากความดัน อุณหภูมิ และแรงเฉือน (shear force) สูงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ส่งผลให้วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพให้อยู่ในรูปของโด (dough) และเคลื่อนที่อยู่ภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตามทิศทางการหมุนของสกรู (screw) ในช่วงระยะที่โดผ่านตัวเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นี้โด จะถูกทำให้เกิดการสุก และทำให้เกิดเป็นรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน ซึ่งเป็นรูเปิดหรือช่องที่อยู่ส่วนสุดท้ายของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เรียกว่า เอกซ์ทรูเดท (extrudate) ซึ่งเอกซ์ทรูเดทที่ได้นี้อาจจะมีลักษณะพองหรือแบนบาง หรือรูปร่างที่หลากหลายขึ้นอยู่กับปัจจัยการผลิต เช่น อุณหภูมิภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์และความเร็วรอบของสกรู เป็นต้น”

### 2.3.1.2 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

Rossen และ Miller (1973) ได้จำแนกประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ออกเป็นหลายรูปแบบตามลักษณะเชิงหน้าที่ (functional characteristics) ลักษณะทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic characteristics) และตามจำนวนสกรู (number of screw) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การแบ่งประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตามลักษณะเชิงหน้าที่ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ พาสตาเอกซ์ทรูเดอร์ (pasta extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่นำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มะกะโรนี ซึ่งเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สุกเพียงเล็กน้อยหรือไม่สุกเลย ประเภทถัดมา คือ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนต่ำ (low-shear cooking extruder) สำหรับประเภทนี้นิยมนำมาใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีความชื้นสูงอยู่จึงมีลักษณะเนื้อผลิตภัณฑ์ที่แน่นมากกว่าการพองตัว และต้องอาศัยขั้นตอนอื่น ๆ เพื่อให้สุกเช่นเดียวกับประเภทแรก ถัดมาเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงดันสูง (high-pressure forming extruder) สำหรับประเภทนี้อุณหภูมิภายในเครื่องค่อนข้างสูง จึงส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะพองและสามารถขึ้นรูปเป็นแบบต่าง ๆ ได้ตามต้องการ สุดท้ายเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนสูง (high-shear cooking extruder) สำหรับประเภทนี้สามารถนำมาใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำจนถึงสูง ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย

2) การแบ่งประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตามลักษณะอุณหภูมิศาสตร์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ออโตจีนัสเอกซ์ทรูเดอร์ (autogenous extruder) ประเภทนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการเสียดสีของวัตถุดิบกับสกรู ส่งผลให้อุณหภูมิภายในของเครื่องขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและการจัดเรียงสกรู ประเภทที่ 2 คือ ไอโซเทอร์มอลเอกซ์ทรูเดอร์ (isothermal extruder) ประเภทนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องได้คงที่ตลอดความยาวของบารเรล สุดท้ายคือ โพลีโทรปิกเอกซ์ทรูเดอร์ (polytropic extruder) ประเภทนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นได้เกิดจากแรงเสียดทานภายในและความร้อนภายนอก

3) การแบ่งประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตามจำนวนสกรู ซึ่งการแบ่งประเภทนี้ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) สำหรับประเภทนี้มีสกรูเพียงอันเดียวสำหรับการขับเคลื่อน ส่งผลให้รูปแบบของการเรียงสกรูมีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องและลักษณะผลิตภัณฑ์ อีกทั้งประเภทนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของการส่งผ่านส่วนผสมที่มีความหนืดต่ำ ส่งผลทำให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ไม่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหาร อีกประเภทคือ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin screw extruder) โดยประเภทนี้ประกอบด้วยสกรู 2 อันที่มีความยาวเท่ากันและสามารถแบ่งออกได้อีกหลาย ประเภทตามลักษณะการเรียงสกรูซึ่งขึ้นกับทิศทางการหมุนของสกรูและลักษณะการซ้อนกันของสกรู สำหรับการแบ่งตามทิศทางการหมุนของสกรู คือ หมุนไปในทิศทางเดียวกันของสกรูทั้ง 2 อัน เรียกว่า corotating twin-screw extruder ประเภทนี้นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่และผสมกันของวัตถุดิบที่ดีและยังสามารถทำความสะอาดด้วยตัวเองได้ด้วย อีกประเภทคือ การหมุนของสกรู 2 อันหมุนในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า counter-rotating twin-screw extruder ประเภทนี้ไม่ได้รับการนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากประเภทนี้เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดไม่มากนัก สำหรับการแบ่งตามลักษณะการซ้อนกันของสกรูสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกมีการเรียงซ้อนกันของสกรูตัวหนึ่งวางหรือซ้อนอยู่ในร่องของสกรูอีกตัวหนึ่ง เรียกว่า intermeshing twin-screw extruder ในประเภทนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุดิบจะถูกผลักไปข้างหน้าและมีการแทนที่กัน ทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการผสมรวมถึงสามารถทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง ประเภทที่ 2 คือ ลักษณะการเรียงของสกรู 2 ตัววางอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ซ้อนกัน ที่เรียกว่า nonintermeshing twin-screw extruder ในประเภทนี้การทำงานของเครื่องขึ้นกับการเสียดสี (friction) แต่โครงสร้างของเครื่องไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการผลักวัตถุดิบเคลื่อนไปข้างหน้าเช่นเดียวกับในประเภทแรก ส่งผลทำให้การผสมของวัตถุดิบในประเภทนี้ไม่ดี สำหรับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่โดยรวมเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบหลากหลายประเภท รวมทั้งใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นหลายระดับและวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันปานกลางด้วย (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541)

### 2.3.1.3 กระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี

#### คุณสมบัติ ทางเคมีและเคมีกายภาพของวัตถุดิบ

ในระหว่างกระบวนการแปรรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ วัตถุดิบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหลากหลายรูปแบบทั้งทางด้านโครงสร้าง คุณสมบัติทางด้านเคมีและเคมีกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีหรือคุณค่าทางโภชนาการ อาทิเช่น การเกิดเจลลาทีนในเซชันของสตาร์ชหรือแป้ง การสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีน การเกิดสารประกอบของอะมิโลสและไขมัน การเกิดผลิตภัณฑ์ของมิลลาร์ด (millard products) การเกิดครอสลิง (cross-linking) ระหว่างโมเลกุล รวมทั้งการเสียหายของเม็ดสี (pigments) วิตามิน (vitamins) และการสูญเสียกลิ่นรส เป็นต้น (Harper, 1981; Bhatnagar และ Hanna, 1994a; 1994b; Ilo และคณะ, 1999; Bhandari และคณะ, 2001) ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Vasanthan และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณใยอาหารของแป้งข้าวบาร์เลย์พันธุ์ CDC-Candle และพันธุ์ Pheonix พบว่า ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้และปริมาณใยอาหารทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นทั้ง 2 พันธุ์หลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันในช่วงอุณหภูมิบารเลที่ 90-140 องศาเซลเซียส และช่วงความชื้นที่ 20-50% โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณใยอาหารที่ละลายได้เกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างจากใยอาหารที่ละลายไม่ได้ไปเป็นใยอาหารที่ละลายได้ในระหว่างกระบวนการแปรรูป สำหรับปริมาณใยอาหารที่ละลายไม่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเฉพาะในแป้งข้าวบาร์เลย์พันธุ์ Pheonix เนื่องจากเกิดการสร้าง RS type 3 หรือ retrograded amylose ในระหว่างการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน นอกจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อสัดส่วนของปริมาณใยอาหารในวัตถุดิบแล้ว กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีผลต่อปริมาณ RS ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.3 (แป้งทนย่อยต่อเอนไซม์) เช่น งานวิจัยของ Dust และคณะ (2004) เกี่ยวกับกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อองค์ประกอบทางเคมีส่วนประกอบต่าง ๆ ในอาหาร และงานวิจัยของ Kim และคณะ(2006) เกี่ยวกับกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณ RS ในแป้งสาลีสำหรับทำเพสทรี เป็นต้น นอกจากนี้ กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีผลต่อสารต้านโภชนาการ (antinutrient) ด้วย เช่น งานวิจัยของ Alonso, Aguirre และ Marzo (2000) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อสารต้านโภชนาการและคุณสมบัติในด้านการย่อยของสตาร์ชและโปรตีนในธัญพืชในกลุ่มถั่ว พบว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้คุณสมบัติในด้านการย่อยของสตาร์ชและโปรตีนมีค่าสูงขึ้น แต่มีผลทำให้สารในกลุ่มโพลีฟีนอล (polyphenol) ซึ่งจัดเป็นสารในกลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) และสารยับยั้งต่าง ๆ เช่น สารยับยั้งเอนไซม์ทริปซิน (trypsin inhibitor) สารยับยั้งเอนไซม์โครโมทริปซิน (chrymotrypsin inhibitor) และสารยับยั้งเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ( $\alpha$ -amylase inhibitor) มีปริมาณลดลง



นอกจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางด้านอาหารอื่น ๆ กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านโครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของวัตถุดิบด้วย เช่น งานวิจัยของ Kadan, Bryant และ Pepperman (2003) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งพบว่า คุณสมบัติของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านความหนืด และดัชนีการดูดซับไขมันของแป้งข้าว (fat absorption index) ที่อุณหภูมิ 55 และ 99 องศาเซลเซียสมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) และดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) มีค่าเพิ่มขึ้น Hagenimana, Ding และ Fang (2006) ก็ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า คุณสมบัติทางด้านความหนืดมีค่าลดลง และค่า WAI และ WSI ของแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับงานวิจัยข้างต้น นอกจากนี้ Hagenimana และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาถึงดัชนีชี้การย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ (starch digestion index, SDI) และการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเพิ่มเติม พบว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันค่า SDI มีค่าเพิ่มขึ้น 2 - 3 เท่าเมื่อเทียบแป้งข้าวที่ไม่ผ่านการแปรรูป ส่วนสีของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งโดยทั่วไป เมื่ออุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ที่เกิดจากการจับกันระหว่างน้ำตาลรีดิวซิงกับกลุ่มอะมิโนอิสระ (free amino group) งานวิจัยของ Ding, Ainsworth, Plunkett, Tucker และ Marson (2005) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงหน้าที่และทางกายภาพของแป้งข้าวสาลีหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ค่า WAI, WSI และอัตราขยายตัว (expansion ratio, ER) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับปัจจัยในด้านการผลิต เช่น ความชื้น อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate) และอุณหภูมิในบารเรล นอกจากนี้ Bhandari, D'Arcy และ Young (2001) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ การรักษากลิ่นรสของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่ได้สูญเสียไปเนื่องจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารบางอย่างลงไปเพื่อทำหน้าที่จับกับกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า การเติม  $\beta$ -cyclodextrin มีส่วนช่วยไม่ให้สูญเสียกลิ่นรสที่ต้องการได้

งานวิจัยของ Bhatnagar และ Hanna (1994) ทำการศึกษาผลของการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในสตรัซข้าวโพด พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันสามารถทำให้เกิดการจับกันระหว่างอะมิโลสและไขมันที่เติมลงไปมีผลทำให้เกิดลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V-pattern ประสิทธิภาพในการจับกับไอโอดีน (iodine binding capacity) มีค่าลดลง ค่า ER คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ในน้ำ (water soluble carbohydrate) WSI มีค่าลดลงแต่มีผลทำให้ค่าความหนาแน่น (bulk density) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบ

กับสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันแต่ไม่มีการเติมไขมันเพิ่มเติม นอกจากนี้มีการศึกษาผลของการเติมเวย์โปรตีนเข้มข้น (whey protein concentrate) ลงในแป้งข้าว แป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่ง และนำไปผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันทั้งในรูปแบบแรงเฉือนต่ำและแรงเฉือนสูง พบว่า การเติมเวย์โปรตีนมากกว่าร้อยละ 25 มีผลทำให้ลดค่าพลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy) ของการแปรรูป และส่งผลให้การขยายตัวและค่า WAI ลดลง รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จะมีลักษณะแข็งและกระด้างมากขึ้น (Onwulata, Konstance, Smith และ Holsinger, 1998)

### 2.3.2 การแปรรูปอาหารด้วยกระบวนการอโตเคลป

การแปรรูปอาหารด้วยกระบวนการอโตเคลป (autoclave process) เป็นการแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนของไอน้ำภายใต้ความดัน ซึ่งการแปรรูปภายใต้ความดันนี้ทำให้เกิดไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส และการทำให้ไอน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 100 องศาเซลเซียสทำได้โดยการเพิ่มความดันให้สูงขึ้นมากกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งความดันนี้เป็นตัวกำหนดจุดเดือดของน้ำ (ตารางที่ 2.1) หลังจากไอน้ำได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไอน้ำจะแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัสดุห่อหุ้มอุปกรณ์หรือภาชนะรองรับวัตถุดิบตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อไอน้ำสัมผัสกับอุปกรณ์ที่อยู่ภายในหรือวัตถุดิบซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ไอน้ำจะเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเล็กๆและเมื่อไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำภายในห่อ ปริมาตรของไอน้ำจะลดลง ทำให้ภายในมีความดันเป็นลบ ไอน้ำก็จะแทรกซึมเข้ามาบริเวณนี้เพิ่มขึ้นอีก และในขณะที่ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ไอน้ำจะคลายความร้อนแฝงออกมาจำนวนมาก ทำให้อุปกรณ์หรือวัตถุดิบที่อยู่ภายในปราศจากเชื้อ และเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาแปรรูป เช่น การเกิดเจลลาทิโนเซชันของสตาร์ชหรือแป้ง การสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีน รวมทั้งอาจสูญเสียหรือมีผลส่งเสริมคุณค่าทางโภชนาการบางอย่างไป อย่างเช่น วิตามิน แร่ธาตุ เป็นต้น ดังนั้น ความนิยมในการใช้หม้อนึ่งความดันหรืออโตเคลปจึงได้รับความนิยมในการฆ่าเชื้อวัตถุดิบและอาหารเลี้ยงเชื้อ และในบางครั้งมีการนำอโตเคลปมาใช้ในขั้นตอนการเจลลาทิโนเซชันของวัตถุดิบสำหรับเตรียมเพื่อทดลองในขั้นตอนถัดไป อาทิเช่น การตัดกึ่งเพื่อเพิ่มปริมาณ RS เป็นต้น (Soto และคณะ, 2004)

#### 2.3.2.1 ประเภทของเครื่องอโตเคลป

เครื่องอโตเคลปที่ใช้กันในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ

- 1) เครื่องอโตเคลปแบบอัตโนมัติ ที่ใช้งานได้ง่ายและสะดวกโดยเครื่องอโตเคลปแบบอัตโนมัติเมื่อเปิดสวิตช์แล้วเครื่องจะให้ความร้อน ทำให้น้ำในเครื่องอโตเคลปร้อนเดือดและ

เกิดไอน้ำ ไอน้ำจะทำการไล่อากาศออกจากเครื่องออโตเคลปหมดแล้ว เครื่องจะอยู่ในระบบปิดสนิทเองโดยอัตโนมัติ

2) เครื่องออโตเคลปแบบไม่อัตโนมัติ ในแบบนี้จะต้องปิดปุ่ม rejecter เมื่อมีไอน้ำออกมาจาก release valve จากนั้นความดัน อุณหภูมิจะสูงขึ้นจนกระทั่งถึงความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว (121 องศาเซลเซียส) นาฬิกาจะทำงานเริ่มจับเวลา ความดันจะถูกรักษาอยู่ในระดับ 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว จนกระทั่งครบ 15 นาทีตามที่ตั้งเวลาไว้ แต่เครื่องจะดับโดยอัตโนมัติความดันจะลดลงจนกระทั่งถึง 0 จากนั้นจึงเปิดฝาเอาของออกจากเครื่อง

### 2.3.2.2 กระบวนการออโตเคลปต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปของวัตถุดิบ

การแปรรูปด้วยออโตเคลปมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ในวัตถุดิบ อาทิเช่น ในงานวิจัยของ Alvarez และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน กระบวนการต้ม กระบวนการออโตเคลป และไมโครเวฟต่อสารทำให้เกิดภูมิแพ้จากถั่วลันเตา (lupine) ซึ่งถั่วลันเตาจัดเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับแป้งข้าวสาลีเพื่อทำเป็นพาสต้า หรือนำมาเติมลงในขนมปังและธัญพืชอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณค่า ในปัจจุบันมีการนำถั่วลันเตามาใช้เป็นทางเลือกหนึ่งแทนเนื้อสัตว์หรือโปรตีนจากพืชเพื่อป้องกันโรคหัวใจ แต่ก็มีกลุ่มคนจำนวนหนึ่งที่มีอาการแพ้ถั่วลันเตา เช่นเดียวกับการแพ้ถั่วลิสง จากการศึกษาพบว่า หลังนำเมล็ดถั่วลันเตาผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 138 องศาเซลเซียสเพียง 5 นาทีมีผลทำให้สารที่ทำให้เกิดการแพ้มีปริมาณลดลงมากกว่าการแปรรูปด้วยวิธีการอื่น ๆ ดังนั้นเห็นได้ว่าการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อช่วยลดสารให้เกิดการแพ้ในพืชตระกูลถั่วได้เช่นกัน นอกจากการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีผลต่อสารก่อให้เกิดภูมิแพ้จากถั่วแล้วยังมีผลต่อปริมาณกรดอะมิโน และความสามารถในการย่อยของโปรตีนด้วย การศึกษาของ Khalil และ Mansour (1995) พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีผลให้ปริมาณกรดอะมิโนลิวซีน ทรีโอนีน และฮิสติดีนในพืชตระกูลถั่วซ็อเฟบาเพิ่มขึ้น ซึ่งกรดอะมิโนเหล่านี้เป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย และกระบวนการออโตเคลปยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการย่อยของโปรตีนและค่า PER value ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และกระบวนการนี้ก็มีผลทำให้ปริมาณแทนนิน สารยับยั้งทริปซิน และ haemagglutinin activity มีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการหมักและการแปรรูปด้วยออโตเคลปต่อสัดส่วนปริมาณใยอาหาร และปัจจัยที่มีผลต่อสารต้านโภชนาการของพืชตระกูลถั่ว (bean) พบว่า ทั้งกระบวนการหมักและการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีผลให้ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้ ปริมาณเซลลูโลสและสารยับยั้งไครโมทริปซิน (chymotrypsin inhibitor) ลดลง แต่ไม่มีผลต่อปริมาณใยอาหารที่ไม่ละลาย (Cabrejas และคณะ, 2004) งานวิจัยของ Guillon, Barry และ Thabault (2006) ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปต่อคุณสมบัติทาง

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันไอน้ำและอุณหภูมิของเครื่องออโตเคลป

Steam pressure in psi at sea level	Temperature		Steam pressure in psi at sea level	Temperature	
	°C	°F		°C	°F
0	100	212	16	122	251.6
1	101.9	215.4	17	123	253.4
2	103.6	218.5	18	124.1	255.4
3	105.3	221.5	19	125	257
4	106.9	224.4	20	126	258.8
5	108.4	227.1	21	126.9	260.4
6	109.8	229.6	22	127.8	262
7	111.3	232.3	23	128.7	263.7
8	112.6	234.7	24	129.6	265.3
9	113.9	237	25	130.4	266.7
10	115.2	239.4	26	131.3	268.3
11	116.4	241.5	27	132.1	269.8
12	117.6	243.7	28	132.9	271.2
13	118.8	245.8	29	133.7	272.7
14	119.9	247.8	30	134.5	274.1
15 <sup>#</sup>	121	249.8			

ที่มา: <http://science.kmutt.ac.th/class/mic291/mic291lab2.doc>

ทางเคมีและกายภาพ และคุณสมบัติด้านการย่อยของแบคทีเรียในอุจจาระมนุษย์ของเยื่อใยของบีต (sugar beet fibre) พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของ เพคตินและอราบินแนนในเยื่อใยของบีต ซึ่งส่งผลทำให้สามารถพองตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้ กระบวนการออโตเคลปมีผลต่อปริมาณกรดกาแลกทูโรนิก (galacturonic acid) และอราบินโนส (arabinose) ซึ่งสาร 2 ตัวนี้ถูกทำให้มีปริมาณลดลงโดยแบคทีเรียในอุจจาระมนุษย์และการ ลดลงของสารทั้ง 2 ตัวนี้มีปริมาณลดลงมากกว่า 80% เมื่อเทียบกับการย่อยโดยแบคทีเรียในมนุษย์ ของเยื่อใยของบีตที่ไม่ผ่านกระบวนการออโตเคลป นอกจากนี้ กระบวนการออโตเคลปยังมีผลต่อ

ปริมาณขององค์ประกอบอื่น ๆ ในวัตถุดิบด้วย เช่น ปริมาณ RS ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.3. (แป้งทนย่อยต่อเอนไซม์) เช่น งานวิจัยของ Escarpa และคณะ (1996) เกี่ยวกับการ RS ของสตาร์ช มันฝรั่งด้วยกระบวนการอโตเคลปแบบใช้ความดันสูง หรือในงานวิจัยของ Onyango และคณะ (2006) เกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มต่อการสร้าง RS type 3 ด้วยกระบวนการอโตเคลปของสตาร์ชมันสำปะหลัง เป็นต้น

นอกจากกระบวนการอโตเคลปจะมีผลต่อปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ แล้ว ยังมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ งานวิจัยของ Chang และ Chang (1998) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการให้ความร้อนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพในแป้งลูกเดี๋ย พบว่า กระบวนการอโตเคลป กระบวนการให้ความร้อนด้วยไอน้ำ (steaming) และกระบวนการต้ม (boiling) ทำให้ค่า WAI ค่ากำลังการพองตัว (swelling power) ระดับการเจลาทีไนเซชัน (degree of gelatinization, DG) และเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ (%digestibility) ที่มีและไม่มีเอนไซม์เปปซินมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่า WSI มีค่าลดลง

## 2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอนุมูลอิสระ และสารต้านการเกิดออกซิเดชัน

### 2.4.1 อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radicals) หมายถึงสารหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนที่ขาดคู่อยู่ในวงรอบของอะตอม ซึ่งทำให้โมเลกุลไม่เสถียรเนื่องจากขาดอิเล็กตรอน จึงจำเป็นต้องหาอิเล็กตรอนเพื่อมาทำให้เกิดความเสถียร ดังนั้นจึงไปแย่งอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพื่อมาทดแทน ซึ่งสารอื่น ๆ ที่ถูกแย่งอิเล็กตรอนไปก็กลายเป็นสารที่สร้างปัญหาต่อเนื่องจากจะต้องไปแย่งเอาอิเล็กตรอนอื่น ๆ มาทดแทน เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ขึ้นต่อเนื่อง นอกจากนี้อนุมูลอิสระที่มีอายุสั้นมากนั้นยังไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อมีการบริโภคอาหารประเภทเนื้อสัตว์และในขณะที่ร่างกายเกิดการเผาผลาญอาหารประเภทนี้จากกลไกของระบบการย่อยของร่างกายก็จะมีของเสียเกิดขึ้นที่เรียกว่า “อนุมูลอิสระ” เป็นจำนวนมากในร่างกายและเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ภายในร่างกาย นอกจากนั้นโดยปกติแล้ว มักจะมีการกล่าวถึงเฉพาะอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในร่างกาย แต่ยังมีสารกระตุ้นอีกตัวหนึ่งที่สำคัญที่เรียกว่า reactive oxygen species (ROS) ซึ่งหมายถึงโมเลกุลที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยา ซึ่งสารตัวนี้อาจเป็นอนุมูลอิสระหรือไม่ใช่อนุมูลอิสระ (nonradicals) ก็ได้ ตัวอย่างของอนุมูลอิสระและ ROS ได้แก่ อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide anion radical) อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) อนุมูลเพอร์ออกไซด์ (peroxide radical) อนุมูลเพอร์ออกซิล (peroxyl radical) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) โอโซน (ozone)

ออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (singlet oxygen) อนุมูลไฮโดรเจน (hydrogen radical) และอนุมูลเมทิล (methyl radical) เป็นต้น (อนันต์ สกฤตภูมิ, 2551)

#### 2.4.1.1 การเกิดขึ้นของอนุมูลอิสระ

การเกิดขึ้นของอนุมูลอิสระในร่างกายของมนุษย์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายของเราเอง สำหรับประเภทนี้เป็นผลเนื่องจากระบบการเผาผลาญอาหารในร่างกาย หรือที่เรียกว่า กระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ตลอดเวลา โดยเป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีและกิจกรรมของเซลล์ในร่างกายที่ต้องดำเนินการตามปกติ เช่น กระบวนการหายใจจะเกิดออกซิเจนที่มีประจุลบ นั่นก็คืออนุมูลอิสระ ซึ่งสารตัวนี้สามารถรวมตัวกับไขมัน LDL ได้ดี และยังสามารถรวมตัวกับสารบางชนิดในร่างกายก่อให้เกิดสารพิษที่ทำลายเนื้อเยื่อ หรืออาจไปเปลี่ยนแปลงข้อมูลทางพันธุกรรมในดีเอ็นเอ ทำให้เซลล์ปกติเปลี่ยนสภาพไปเป็นเซลล์มะเร็ง เป็นต้น

2) อนุมูลอิสระที่มาจากนอกร่างกาย ซึ่งเกิดได้จากหลากหลายปัจจัยด้วยกัน คือ จากการได้รับเชื้อโรค เช่น การติดเชื้อไวรัสหรือเชื้อแบคทีเรีย โรคเกี่ยวกับภูมิคุ้มกัน (autoimmune diseases) เช่น ข้ออักเสบ รูมาตอยด์ จากรังสี เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา จากมลภาวะเช่น คาร์บอนหิมะ ฝุ่น จากท่อไอเสียรถยนต์ เช่น ไนโตรสออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ เขม่าจากเครื่องยนต์ ฝุ่น จากกระบวนการประกอบอาหาร เช่น การย่างเนื้อสัตว์ที่มีส่วนประกอบของไขมันสูง การนำน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารที่มีอุณหภูมิสูงๆกลับมาใช้อีก ทำให้เกิดอาหารประเภทเกรียม ไหม้ หรือเกิดจากการปิ้งย่าง จากยาบางชนิด เช่น โดโซรูบิซิน (doxorubicin) เพนิซิลลามิน (penicillamine) พาราเซตามอล (paracetamol) เป็นต้น

การเกิดขึ้นของอนุมูลอิสระทั้งจากภายในและภายนอกส่งผล

ก่อให้เกิดความเสียหายและอันตรายต่อร่างกาย ซึ่งนำไปสู่ภาวะการเกิดพยาธิสภาพของโรคบางโรคได้ หรือทำให้เซลล์ผิดปกติดังที่กล่าวข้างต้น โดยโรคต่าง ๆ ที่เกิดจากการที่ร่างกายได้รับอนุมูลอิสระสะสมในปริมาณที่สูง อย่างเช่น โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคเกี่ยวกับระบบภูมิคุ้มกันทำงานผิดปกติ โรคข้ออักเสบ โรคอัลไซเมอร์ (alzheimer) และโรคพาร์กินสัน (parkinson) เป็นต้น (นวลศรี รักษิยะธรรม และอัญญา เจนวิถีสุข, 2545) ภาวะเหล่านี้สามารถควบคุมและแก้ไขได้โดยสารตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า สารต้านอนุมูลอิสระ หรือ สารแอนติออกซิเดนท์ ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดกระบวนการออกซิเดชันที่เป็นสาเหตุให้เกิดอนุมูลอิสระ

## 2.4.2. สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant หรือ antiradical) เป็นสารในกลุ่มเอนไซม์หรือสารอื่นที่มีฤทธิ์สามารถชะลอหรือป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเริ่มต้นหรือซับสเตรต (substrate) สารเริ่มต้นหรือซับสเตรตนี้ คือ สารที่สามารถทำปฏิกิริยาในเซลล์ ซึ่งรวมถึงสารเกือบทุกชนิดในร่างกายเช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ดีเอ็นเอ แต่ถ้าในบางสภาวะที่มีปริมาณอนุมูลอิสระมากจนระบบสารต้านอนุมูลอิสระทำงานไม่ทันจะเกิดสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงมาก (oxidative stress) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเซลล์ได้ เช่น ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของดีเอ็นเอ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเกิดการทำลายโมเลกุลที่มีพันธะซัลไฮไดรล (S-H) และเชื่อมเซลล์ เป็นต้น โดยจะก่อเกิดผลเสียต่อเซลล์และการทำลายเซลล์ทำให้เกิดความแก่ และรุนแรงไปถึงการเกิดเป็นโรค เช่น เส้นเลือดตีบ โรคเกี่ยวกับภูมิคุ้มกัน และโรคมะเร็ง เป็นต้น (อนันต์ สุกุลกิม, 2551)

การทำลายโมเลกุลที่เป็นต้นเหตุของการเกิดอนุมูลอิสระเป็นกลไกของระบบต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทำงานของระบบเอนไซม์หรือไม่ใช่ระบบเอนไซม์ก็ได้ โดยปกติสารต้านอนุมูลอิสระมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ สารที่พบในร่างกายและสารที่พบในอาหาร

**2.4.2.1 สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในร่างกาย** แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ สารในกลุ่มที่เป็นเอนไซม์ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide Dismutase) คาทาเลส (catalase) กลูตาไทโอนเพอร์ออกซิเดส (glutathione peroxidase) กลูตาไทโอนรีดักเทส (glutathione reductase) กลูตาไทโอนทรานส์เฟอเรส (glutathione transferase) และในอีกกลุ่มหนึ่งคือ สารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น กลูตาไทโอน (glutathione) กรดลิพอยิก (lipoic acid) เซอรูโลพลาสมิน (ceruloplasmin) แอลบูมิน (albumin) ทรานส์เฟอริน (transferrin) แฮพโทโกลบิน (haptoglobin) ฮีโมเพกซิน (hemopexin) กรดยูริก (uric Acid) บิลิรูบิน (bilirubin) และซิสทีน (cysteine) เป็นต้น

**2.4.2.2 สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในอาหารและไม่เอนไซม์** เช่น วิตามินอี (tocopherols) แคโรทีนอยด์ (carotenoids) วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) สเตียรอยด์ (stearoids) ยูบิควิโนน (ubiquinone) ไทออล (thiols) อิมโนซิน (imosine) ทัวรีน (taurine) ไพรูเวต (pyruvate) กรดแกลลิก (gallic acid) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) โทรลอกซ์ (trolox) บีเอชที (BHT) และบีเอชเอ (BHA) เป็นต้น

## 2.4.3 ดัชนีชีวภาพสำหรับชี้วัดภาวะถูกออกซิไดซ์เกินสมดุล (โอภา วัชรคุปต์ และคณะ, 2550)

ดัชนีชีวภาพ (biomarker) สำหรับชี้วัดภาวะถูกออกซิไดซ์เกินสมดุล มีแนวทางการวัดได้ 2 แนวทาง คือ การวัดปริมาณอนุมูลอิสระโดยตรงและการวัดโดยอ้อม ซึ่งการวัดความเสียหายที่เกิดจากอนุมูลอิสระและสารที่เกี่ยวข้องที่เป็นต้นเหตุของการเกิดอนุมูลอิสระด้วยวิธีการวัดโดยตรงเป็นไปได้

ได้ยาก เนื่องจากอนุมูลอิสระมีระยะครึ่งชีวิตสั้นมากซึ่งอยู่ในระดับวินาทีจึงทำให้การวัดโดยตรงเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้จะมีเครื่องมือพิเศษสำหรับการวัด คือ เครื่องอิเล็กทรอนิกส์พาราแมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (electron paramagnetic resonance spectroscopy, EPR) หรือเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (electron spin resonance spectroscopy, ESR) ดังนั้นในการตรวจหาดัชนีชีวภาพที่ใช้วัดภาวะถูกออกซิไดซ์ที่เกินสมดุลจึงเป็นวิธีการวัดทางอ้อม ซึ่งวิธีการวัดนี้สามารถวัดได้จากปริมาณชีวโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปหรือถูกทำลายโดยอนุมูลอิสระ โดยวิธีการวัดสามารถทำได้หลากหลายวิธี คือ

1) วัดปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ หรือ สารต้านออกซิเดชันที่อยู่ในร่างกายตามธรรมชาติ เช่น วิตามินซี วิตามินอี และกลูตาไทโอน เป็นต้น

2) วัดปริมาณเอนไซม์ที่ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระและสารที่เกี่ยวข้อง หรือทำหน้าที่ขจัดอนุมูลอิสระหรือต้านออกซิเดชัน เช่น เอนไซม์เอสโอดี และเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส เป็นต้น

3) วัดปริมาณความเสียหายที่เกิดกับชีวโมเลกุลที่สำคัญในร่างกาย ได้แก่ การวัดสารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการที่ลิพิด โปรตีน และดีเอ็นเอ ถูกออกซิไดซ์โดยอนุมูลอิสระหรือผลิตภัณฑ์จากอนุมูลอิสระ

4) วัดประสิทธิภาพหรือความสามารถโดยรวมในการต้านอนุมูลหรือต้านออกซิเดชัน (total antioxidant capacity, TAC) โดยการนำเลือด พลาสมา หรือสารต้านออกซิเดชันมาหาความสามารถโดยรวมในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการต่าง ๆ โดยในวิธีการวิเคราะห์นี้มีหลักการสำคัญในการวิเคราะห์ 2 อย่างคือ การวิเคราะห์จากการส่งผ่านอะตอมไฮโดรเจน (hydrogen atom transfer, HAT) เช่น วิธี oxygen radical absorbance capacity assay (ORAC) และวิธี total radical-trapping antioxidant parameter (TRAP) และการวิเคราะห์จากการส่งผ่านอิเล็กตรอนเดี่ยว (electron transfer, ET หรือ SET) เช่น วิธี ferric reducing ability of plasma assay (FRAP) วิธี trolox equivalent antioxidant capacity assay (TEAC) และวิธี diphenyl-1-picrylhydrazyl assay (DPPH)

การพิจารณาเลือกดัชนีบ่งชี้ภาวะถูกออกซิไดซ์เกินสมดุลโดยอนุมูลอิสระ และวิธีการวิเคราะห์สามารถใช้เกณฑ์ในการพิจารณาเรียงลำดับความสำคัญดังนี้ คือ ความเฉพาะเจาะจง ความคงตัว ความถูกต้อง ความแม่นยำ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกับอาการหรือโรค นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงความยากง่ายในการวิเคราะห์ เครื่องมือที่ใช้ กลไกของปฏิกิริยา รวมทั้งการพิจารณาการวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายในน้ำหรือละลายในลิพิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 เกณฑ์สำหรับพิจารณาเลือกวิธีการวิเคราะห์ดัชนีความสามารถในการต้านอนุมูล (TAC)

วิธีการวิเคราะห์	ความง่าย	เครื่องมือ	กลไกการเปลี่ยนแปลง	กลไก	จุดยุติ	การวัดปริมาณ	การสูญเสียไขมัน-น้ำ
ORAC	++	+	+++	HAT	fixed time	AUC	+++
TRAP	---	-- พิเศษ	+++	HAT	lag phase	IC50 lag time	--
FRAP	+++	+++	+++	SET	time, varies	OD fixed time	---
TEAC	+	+	-	SET	time	OD fixed time	+++
DPPH	+	+	-	SET	IC50	OD fixed time	-
LDL oxidation	-	+++	+++	HAT	lag phase	lag time	
Photochem	+	-- พิเศษ	++	?	fixed time	lag time หรือ AUC	+++

+, ++, +++ เข้าเกณฑ์จากน้อยไปมาก --, --- (ไม่ตรงเกณฑ์จากน้อยไปมาก)

ที่มา : โอภา วัชรคุปต์ และคณะ, 2550

#### 2.4.4 กระบวนการแปรรูปต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ

การศึกษาการแปรรูปด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น 3 วิธี คือ กระบวนการแปรรูปด้วยไอน้ำ กระบวนการอบได้เคลปและกระบวนการทำแห้งด้วยลูกกลิ้งคู่ (drum drying) ต่อการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวโอ๊ต พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการอบได้เคลปมีผลต่อการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุด โดยการแปรรูปด้วยกระบวนการอบได้เคลปมีส่วนช่วยเพิ่มระดับโทโคฟีรอล (tocopherol) tocotrienol vanillin ferulic acid และ *p*-coumaric acid ยกเว้น  $\beta$ -tocotrienol และทำให้ระดับ avenanthramide ลดลง ส่วนสาร caffeic acid จะถูกกำจัดไป (Bryngelsson, Dimberg, และ Eldin, 2002) นอกจากนี้ จากฐานข้อมูลทางยาของประเทศเกาหลี พบว่า ได้มีการทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยกระบวนการอบได้เคลปต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของต้นโสม พบว่า กระบวนการอบได้เคลปที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 นาที และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 และ 120 นาที มีผลทำให้ปริมาณ ginsenoside ทั้งหมดมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการอบได้เคลป แต่กลับมีผลทำให้ปริมาณ acidic polysaccharide ทั้งหมด ฟีนอลิกทั้งหมด และประสิทธิภาพในการต้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant capacity) มีปริมาณเพิ่มขึ้น (Tack และ Mi, 2009)

การศึกษาของ Kim และคณะ (2006) ที่ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อ antioxidant activity ในเมล็ดองุ่น (grape seed) พบว่า หลังจากการให้ความร้อนแล้วทำการสกัดด้วย 70% ethanol เพื่อหาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic) radical scavenging activity (RSA) และ reducing power พบว่า การให้ความร้อนด้วยเตาเผา (electric muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 50, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 60, 90 และ 120 นาที ทำให้ antioxidant activity ของสารสกัดจากเมล็ดองุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Jeong, Kim, Kim,

Nam, Ahn และ Lee (2004a) และ Jeong, Kim, Kim, Jo, Nam, และ Ahn (2004b) พบว่า การให้ความร้อนสามารถทำให้ insoluble phenolic compound เปลี่ยนเป็น soluble phenolic compound ดังนั้น การให้ความร้อนจึงมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณของสารประกอบที่มี activity ส่งผลให้ค่า antioxidant activity เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิในการให้ความร้อน โดยปริมาณความร้อนที่ให้ถ้ามากเกินไปจะทำให้สารประกอบที่มี activity เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่มี activity ในช่วงความยาวคลื่นที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งความร้อนที่ให้นั้นทำให้เกิดการสลายโครงสร้างของสารประกอบที่มี activity การศึกษาของ Lee และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อ antioxidant activity ของสารสกัดจากเปลือกถั่ว (peanut hull) ด้วยน้ำ พบว่า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 40 และ 60 นาทีช่วยเพิ่ม antioxidant activity โดยการเพิ่มขึ้นเพิ่มตามระยะเวลาการให้ความร้อน ซึ่งในการศึกษาทำการวัดค่า antioxidant activity ด้วยวิธี total phenolic RSA และ reducing power

## 2.5 รายการอ้างอิง

- กมลวรรณ แจ่มชัด. (2541). การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอ็กซ์ทราซัน. *อุตสาหกรรมเกษตร*. 9(2): 4-8.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- คำริ แยมสนรัตน์. (2503). การปลูกเคียว. *กสิกร*. 33(6): 495-501.
- จรัสพรรณ ต้นหยง. (2544). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอ้ข้าวกล้องผสมกิ่งสำเร็จรูป. *วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*.
- ชัยโย ชัยชาญพิพุทธ, มยุรี หาญตระกูล, เกรียงศักดิ์ พูนสุข, โสภณ เรืองสำราญ, สมใจ เฟื่องปรีชา และอมร เพชรสม. (2524). *สมุนไพรอันดับที่ 02*. โครงการศึกษาวิจัยสมุนไพร. กรุงเทพฯ
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน. (2530). *ลูกเคียว : คุณสมบัติบางประการและผลิตภัณฑ์*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2530). การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งและสตาร์ชลูกเคียว. *วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์)* 21: 371-377.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2531). ผลิตภัณฑ์ลูกเคียว. *วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย์)* 22: 103-109.
- นิชยา รัตนานนท์. (2535). *เคมีอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ.
- นวลศรี รักษาริยะธรรม และอัญชญา เจนวิถีสุข. (2545). *แอนติออกซิเดนท์ สารต้านมะเร็งในผักสมุนไพรไทย*. นพบุรีการพิมพ์ เชียงใหม่.

- ประชา บุญญศิริกูล. (2537). บทบาทของเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย. *อาหาร*. 24(1): 1-12.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. (2541). *วิศวกรรมอาหาร : หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม*. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- วิไล รังสาดทอง. (2545). *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 2 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ.
- สุนีย์ เสริมสิริโสภณ. (2546). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศิริพร จันทนา. (2529). การใช้แป้งลูกเดือยในการทำนมจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนันต์ สกุลกิม. (2551) อนุมูลอิสระ สารอันตรายต่อสุขภาพและร่างกาย. *ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์* 8(1): 28-33.
- โอภา วัชรคุปต์, ปรีชา บุญจุง, จันทนา บุญยะรัตน์ และมาลีรักษ์ อัดต์สินทอง. (2550). สารต้านอนุมูลอิสระ **Radical Scavenging Agent**. พิมพ์ครั้งที่ 2 นิเวศมิตรการพิมพ์ กรุงเทพฯ.
- Álvarez, J.A., Guillaón, E., Crespo, J.F., Cuadrado, C., Burbano, C., Rodríguez, J., Fernández, C. and Muzquiz, M. (2005). Effect of extrusion, boiling, autoclaving, and microwave heating on lupine allergenicity. **J.Agric. Food Chem.** 53: 1294-1298.
- Alonso, R., Aguirre, A. and Marzo, F. (2000). Effect of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. **Food Chem.** 68: 159-165.
- Aryee, F. N. A., Oduro, J., Ellis, W. O. and Afuakwa, J. J. (2006). The physicochemical properties of flour sample from the root of 31 varieties of cassava. **Food Control.** 17: 916 -922.
- Available: <http://science.kmutt.ac.th/class/mic291/mic291lab2.doc>
- Bhandari, B., D'Arcy, B. and Young, G. (2001). Flavour retention during high temperature short time extrusion cooking process: a review. **Int. J. Food Sci. Tech.** 36: 453-461.
- Bhatnagar, S. and Hanna, M. (1994a). Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches. **Cereal Chem.** 71(6): 582-587.
- Bhatnagar, S. and Hanna, M. (1994b). Extrusion processing conditions for amylose-lipid complexing. **Cereal Chem.** 71(6): 587-593.

- Brouns, F., Kettlitz, B. and Arrigoni, E. (2002). Resistant starch and the butyrate revolution. **Trends Food Sci. Technol.** 13: 251-261.
- Bryngelsson, S., Dimberg, L. H., and Eldin, A. K. (2002). Effect of commercial processing on levels of antioxidants in oats (*Avena sativa* L.). **J. Agric. Food Chem.** 50(7): 1890 - 1896.
- Cairns, P., Morris, V.J., Botham, R.L. and Ring, S.G. (1996). Physiochemical studies on resistant starch in vitro and in vivo. **J. Cereal Sci.** 23: 265-275
- Chang, H. C., Huang, Y. C. and Hung, W. C. (2003). Antiproliferative and chemopreventive effect of adlay seed on lung cancer in vitro and in vivo. **J. Agri. Food Chem.** 51: 3656-3660.
- Chang, S. M. and Chang, T. L. (1998). Effect of various thermal treatments on the physicochemical properties of adlay. **Bull. Inst.** 45: 55-65.
- Chanvrier, H., Uthayakumaran, S., Appelqvist, I. A. M., Gidley, M. J., Gilbert, E. P. and Rubio, A. L. (2007). Influence of storage conditions on the structure, thermal behavior, and formation of enzyme-resistant starch in extruded starches. **J. Agric. Food Chem.** 55: 9883-9890.
- Chiang, W., Cheng, C-H., Chiang, M-T., and Chung, K-T. (2000). Effects of dehulled adlay on the culture count of some microbiota and their metabolism in the gastrointestinal tract of rats. **J. Agric. Food Chem.** 48: 829-832.
- Chun, K. S., Chiang, W. and Kuo, M. L. (2004). Effect of adlay on azoxymethane-induced colon carcinogenesis in rats. **Food Chemical Toxic.** 42: 1339 – 1347.
- Chung, H. J., 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 from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in Canada. **Food Res. Inter.** 41: 869-875.
- Ding, Q. B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G. and Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. **J. Food Eng.** 73: 142-148.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M. and Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. Euro. **J. Clinic. Nutri.** 46(2): S33-S50.

- Escarpa, A., González, M. C., Mañas, E., Diz, G. and Calixto, F. S. (1996). Resistant starch formation : standardization of a high-pressure autoclave process. **J. Agric. Food Chem.** 44: 924-928.
- Faraj, A., Vasanthan, T. and Hoover, R. (2004). The effect of extrusion cooking on resistant starch formation in waxy and regular barley flours. **Food Res. Inter.** 37: 517 – 525.
- Fernando, E. O. (2004). Interaction between amylose, native potato, hydrophobically modified potato and amylopectin potato starches. Ph.D. Dissertation, University of Loud, Sweden.
- Goni, L., Garcia, L., Manas, E. and Calixto, F. S. (1996). Analysis of resistant starch : method for foods and food products. **Food Chem.** 56(4): 445-449.
- Guillon, F., Barry, J-L. and Thibault, J-F. (2006). Effect of autoclaving sugar-beet fibre on its physicochemical properties and its in vitro degradation by human faecal bacteria. **J. Food Sci. Foo Agric.** 60(1): 69-79.
- Guraya, H. S., James, C. and Champagne, E. T. (2001). Effect of enzyme concentration and storage temperature on the formation of slowly digestible starch from cooked debranched rice starch. **Starch/Stärke.** 53: 131-139.
- Hagenimana, A., Ding, X. and Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. **J. Cereal Sci.** 43: 38-46.
- Hararumpu S. G. (2000). Resistant starch-a review of physical properties and biological impact of RS<sub>3</sub>. **Carbohydr. Polym.** 41: 285-292.
- Harper, J. M. (1981). **Extrusion of food.** Vol. I. CRC Press Florida.
- Hizukuri, S. (1996). Starch : analytical aspect In A.C. Eliasson (ed.). **Carbohydrate in Food.** (pp. 347-429). New York: Marcel Dekker.
- Hung, W. C. and Chang, H. C. (2003). Methanolic extract of adlay seed suppresses COX-2 expression of human lung cancer cells via inhibition of gene transcription. **J. Agric. Food Chem.** 51: 7333-7337.
- Huth, M. Dongowski, G., Gebhardt, E. and Flamme, W. (2000). Functional properties of dietary fiber enriched extrudates from barley. **J. Cereal Sci.** 32: 115-128.
- Ilo, S., Liu, Y. and Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 32: 79-88.

- Jeong, S. M., Kim, S. Y., Kim, D. R., Nam, K. C., Ahn, D. U., and Lee, S. C. (2004a). Effect of seed roasting conditions on the antioxidant activity of defatted sesame meal extracts. **J. Food Sci.** 69: 377-381.
- Jeong, S. M., Kim, S. Y., Kim, D. R., Jo, S. C., Nam, K. C. and Ahn, D. U. (2004b). Effect of heat treatment on antioxidant activity of citrus peels. **J. Agri. Food Chem.** 52: 3389-3393.
- Kadan, R. S., Bryant, R. J. and Pepperman, A. B. (2003). Functional properties of extruded rice flours. **J. Food Sci.** 68(5): 1669-1672.
- Kang, B-S, Kim, B-Y. and Hahm, Y-T. (2001). Optimization of the extrusion processing conditions for Job's tear. **Food Sci. Biotechnol.** 10(2): 123-127.
- Kim, J. H., Tanhehco, E. J. and Ng, P. K. W. (2006). Effect of extrusion conditions on resistant starch formation from pastry wheat flour. **Food Chem.** 99: 718-723.
- Kim, S. Y., Jeong, S. M., Park, W. P., Nam, K. C., Ahn, D. U. and Lee, S. C. (2006). Effect of heating conditions of grape seeds on the antioxidant activity of grape seed extracts. **Food Chem.** 97: 472-479.
- Khalil, A. H. and Mansour, E. H. (1995). The effect of cooking, autoclaving and germination on the nutritional quality of feba beans. **Food Chem.** 54(2): 177-182.
- Kuo, C. C., Chang, W., Liu, G. P., Chen, Y. L., Chang, J. Y., Lee, C. K., Lo, J. M., Huang, S. L., Shih, M. C. and Kuo, Y. H. (2002). 2,2'-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical-scavenging active components from adlay (Coix lachryma-jobi L. Var. ma-yuen Stapf) hulls. **J. Agric. Food Chem.** 50: 5850-5855.
- Lee, S. C., Jeong, S. M., Kim, S. Y., Park, H. R., Nam, K. C. and Ahn, D. U. (2006). Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. **Food Chem.** 94: 489-493.
- Lehmann, U., Jacobasch, G. and Schmiedl, D. (2002). Characterization of resistant starch type III from banana (Musa acuminata). **J. Agric. Food Chem.** 50: 5236-5240
- Li, J. and Corke, H. (1999). Physicochemical properties of normal and waxy Job's tears (Coix lachryma-jobi L.) starch. **Cereal Chem.** 76(3): 413-416.
- Martín-Cabrejas, M. A., Sanfiz, B., Vidal, A., Mollá, E., Esteban, R. and López-Andréu, F. J. (2004). Effect of fermentation and autoclaving on dietary fiber fractions and antinutritional factors of bean (Phaseolus vulgaris L.). **J. Agric. Food Chem.** 52: 261-266.

- Niba, L. L. (2003). Effect of storage period and temperature on resistant starch and  $\beta$ -glucan content in cornbread. **Food Chem.** 83: 493-498.
- Nielsen, S. S. (1994). **Introduction to the Chemical Analysis of Foods**. Boston : Jones and Bartlett Publishes.
- Numuta, M., Yamamoto, A., Moribayashi, A. and Yamada, H. (1994). Antitumor components isolated from the Chinese herbal medicine Coix lachryma-jobi L. **Planta Med.** 60(4): 356-359.
- Onwulata, C. I., Konstance, R. P., Smith, P. W., and Holsinger, V. H. (1998). Physical properties of extruded products as affected by cheese whey. **J. Food Sci.** 63(5): 814-818.
- Onyango, C., Bley, T., Jacob, A., Henle, T. and Rohm, H. (2006). Influence of incubation temperature and time on resistant starch type III formation from autoclaved and acid-hydrolysed cassava starch. **Carbohydr. Polym.** 66: 494-499.
- Prakash, A. (2001). Analytical progress antioxidant activity. **Medallion Laboratories.** 19:1-6.
- Ragae, S., Abdel-Aal, E-S. M., Noaman, M. (2005). Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. **Food Chem.** 98: 32-38.
- Riaz, M. N. (2000). **Extruders in food applications**. Technomic Publishing Company, Inc. the United States of America.
- Rossen, J. L. and Miller, R. C. (1973). Food extrusion. **Food Technol.** 27(8): 46-53.
- Rosin, P. M., Lajolo, F. M. and Menezes, E. W. (2002). Measurement and characterization of dietary starch. **J. Food Compos. Anal.** 15: 367-377.
- Saguilán, A. A., Huicochea. E. F., Tovar, J., Suárez, F. G., Meraz, F. G. and Pérez, L. A. B. (2005). Resistant starch-rich powders prepared by autoclaving of native and lintnerized banana starch: partial characterization. **Starch/Stärke.** 57: 405-412.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S. and Kulkarni, P. R. (2006). Resistant starch- A review. **CRFSFS.** 5: 1-17.
- Sandhu, K. S. and Lim, S. T. (2008). Structure characteristics and in vitro digestibility of mango kernel starches (Mangifera indica L.). **Food Chem.** 107: 92-97.
- Schmidl, D., Baurelein, M., Bengs, H. and Jacobasch, G. (2000). Production of heat-stable, butyrogenic resistant starch. **Carbohydr. Polym.** 43: 183-193.

- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T. (1992). Antioxidant properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. **J. Agric Food Chem.** 40: 945-948.
- Shin, S. I., Kim, H. J., Ha, H. J., Lee, S. H. and Moon, T. W. (2005). Effect of hydrothermal treatment on formation and structural characteristics of slowly digestible non-pasted granular sweet potato starch. **Starch/Stärke.** 57: 421-430.
- Sievert, D. and Pomeranz, Y. (1989). Enzyme-resistant starch I. characterization and evaluation by enzymatic, thermoanalytical and microscopic methods. **Cereal Chem.** 66(4): 342-347.
- Siljeström, M., Westerlund, E., Björck, I., Holm, J., Asp, N.-G., and Theander, O. (1986). The effects of thermal processes on dietary fibre and starch content of whole grain wheat and flour. **J. Cereal Sci.** 4: 315-323.
- Skrabanja, V. and Kreft, I. (1998). Resistant starch formation following autoclaving of buckwheat (Fagopyrum esculentum Moench) groats. an in vitro study. **J. Food Chem.** 46: 2020-2023.
- Soto, R. A. G., Acevedo, E. A., Feria, J. S., Villalobos, R. R. and Pérez, L. A. B. (2004). Resistant starch made from banana starch by autoclaving and debranching. **Starch/Stärke.** 56: 495-499.
- Soto, R.A.G., Escobedo, R.M., Sánchez, H.H., Rivera, M.S. and Pérez, L.A.B. (2007). The influence of time and storage temperature on resistant starch formation from autoclaved debranched banana starch. **Food Res. Int.** 40(2): 304-310.
- Szczodrak, J. and Pomeranz, Y. (1991). Starch and enzyme-resistant starch from high-amylose barley. **Cereal Chem.** 68(6): 589-596.
- Tack, K. K. and Mi, Y. K. (2009). Effect of hot water boiling and autoclaving on physicochemical properties of american ginseng (Panax quinquefolium L.). **MedRIC.** 33: 40-47.
- Tovar, J. and Melito, C. (1996). Steam-cooking and dry heating produce resistant starch in legumes. **J. Agric. Food Chem.** 44:2642-2645.
- Tsai, C. E., Yang, L., Su, P., and Chen, R. M-Y. (1998). Beneficial effect of adlay on plasma lipids in hamsters and hyperlipidemic and diabetic patients. **Atherosclerosis.** 136: Supplement 1.p.S43.



- Tseng, Y. H, Yang, J. H., Chang, H. L. Lee, Y. L. and Mau, J. L.(2005). Antioxidant properties of methanolic extracts from monascal adlay. **Food Chem.** 97: 375-381.
- Yang, C-C., Chang, S-M and Yan H-Y. (1998). Adlay starch and its structure of amylopectin. **Bull. Inst. Chem.** 45: 67-78.
- Zhang, G., Ao, Z. and Hamaker, B. R. (2006). Slow digestion properties of native cereal starches. **Biomacromolecules.** 7: 3252-3258.
- Zhang, G., Ao, Z. and Hamaker, B. R. (2008). Nutritional property of endosperm starches from maize mutants: A parabolic relationship between slowly digestible starch and amylopectin fine structure. **J. Agric. Food Chem.** 56:4686-4694.

### บทที่ 3

## โครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของลูกเดี๋ย

### Structure, Composition, Chemical and Physicochemical Properties of Job's Tear

#### 3.1 บทคัดย่อ

ลักษณะรูปร่างของเมล็ดลูกเดี๋ยจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในแนวขวางมีลักษณะค่อนข้างกลมและรี คล้ายคลึงกับรูปดอกบัวหรือรูปไข่ ในขณะที่รูปร่างตามแนวยาวมีลักษณะคล้ายคลึงวงรีและมีร่องบริเวณตรงกลางเมล็ด ส่วนตำแหน่งของคัพภะของลูกเดี๋ยอยู่บริเวณร่องกลางของเมล็ดและต่อจากส่วน black layer และมีปริมาณของคัพภะอยู่ประมาณ 1 ใน 3 ของเมล็ด

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่ผ่านการแยกคัพภะออกของลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำ พบว่าปริมาณโปรตีนและไขมันของแป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวมีปริมาณ 13.54 และ 4.86% ตามลำดับและพันธุ์ดำมีปริมาณ 16.85 และ 5.35% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโปรตีนของแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกคัพภะออกไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch) 10-16% ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch) 36-45% และปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch) 39-52% สำหรับ antioxidant properties ของแป้งลูกเดี๋ยทั้ง 2 พันธุ์นั้น พบว่า ลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 7.33-8.18 mgGAE/g DPPH radical scavenging activity 5.40-7.53% reducing power 2.56-2.88 และปริมาณ coixenolide 0.02-0.53  $\mu\text{g/g}$

สตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A รูปร่างเม็ดสตาร์ชเป็นแบบกลม หลายเหลี่ยม ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 11.68-12.29 ไมครอน สตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวมีปริมาณอะไมโลส 10.34% และพันธุ์ดำมี 17.01% อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำมีการกระจายของสายโซ่ของกลูแคนมากที่สุดที่ degree of polymerization (DP) 13-24 คือ 49.02 และ 48.65% ตามลำดับ และมีขนาดของสายโซ่กลูแคนเฉลี่ยอยู่ที่ DP 21.01 และ 20.78 ตามลำดับ ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเดี๋ย 2 พันธุ์ที่ตรวจสอบด้วย Differential

Scanning Calorimetry มีค่า 63-82 องศาเซลเซียส การเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชใช้ระยะเวลา 39 วันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส คุณสมบัติการเกิดเพสท์วิเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer, ถูกเคียวพันธุ์ข้าวให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าเบรคดาว์น (breakdown) สูงกว่าพันธุ์ดำทั้งในแป้งเต็มเมล็ด แป้งที่แยกคัพพะออกและสตาร์ช อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ของสตาร์ช แป้งที่แยกคัพพะออกและแป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวมีค่า 73.3, 75.9 และ 77.0 องศาเซลเซียสตามลำดับ และของสตาร์ช แป้งที่แยกคัพพะออกและแป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำมีค่า 71.3, 88.9 และ 93.1 องศาเซลเซียสตามลำดับ กำลังการพองตัวของสตาร์ชถูกเคียวพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว แต่ค่าการละลายของสตาร์ชพันธุ์ดำมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ขาว และให้ผลในทางตรงข้ามในแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกคัพพะออก

### 3.2 บทนำ

เมล็ดธัญพืชจัดเป็นอาหารหลักที่สำคัญสำหรับมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักในเมล็ดธัญพืชจัดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของสารอาหารประเภทโปรตีน วิตามินและแร่ธาตุอีกด้วย โดยทั่วไป โครงสร้างของเมล็ดธัญพืชประกอบด้วย 6 ส่วนหลักคือ เปลือกหุ้มผล (pericarp) เปลือกหุ้มเมล็ด (testa) ชั้นเยื่อโปร่งใส (hyaline layer) ชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) เอนโดสเปิร์ม (endosperm) และคัพพะ (germ) ซึ่งในระหว่างการขัดสีเมล็ดจะทำให้สูญเสียส่วนเปลือกหุ้มเมล็ด ชั้นเยื่อโปร่งใส ชั้นแอลิวโรนรวมทั้งส่วนคัพพะด้วย โดยส่วนที่สูญเสียไปเป็นส่วนที่อุดมไปด้วยสารอาหารต่าง ๆ แต่ก็มีธัญพืชบางชนิดที่ไม่เกิดการสูญเสียส่วนคัพพะในระหว่างการขัดสีเมล็ด อาทิเช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด เป็นต้น เนื่องจากส่วนของคัพพะของธัญพืชนี้ อยู่ภายในโครงสร้างที่มีส่วนของเอนโดสเปิร์มห่อหุ้มอยู่ ซึ่งทำให้การรับประทานเมล็ดธัญพืชนี้ ยังคงได้รับสารอาหารที่อยู่ในส่วนนี้ด้วย ตัวอย่างสารอาหารที่อยู่ในส่วนคัพพะ เช่น ในคัพพะของเมล็ดข้าวสาลี ประกอบด้วย โปรตีน 32.9% ไขมัน 3.8% เถ้า 4.9% และยังอุดมไปด้วยวิตามินต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นแหล่งของวิตามิน E ที่ดีที่สุดด้วย นอกจากนี้ยังพบกรดลิโนเลอิกมากที่สุด ซึ่งกรดลิโนเลอิกจัดเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2532) โครงสร้างของเมล็ดธัญพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของรูปร่างของเมล็ด โครงสร้างของเมล็ดรวมทั้งสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีในแต่ละส่วนของเมล็ด โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับสปีชีส์และพันธุกรรมของแต่ละธัญพืชนั้น ตัวอย่างเช่น รูปร่างของเมล็ดข้าว ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอต ข้าวไรย์ และข้าวทริติคัลมีรูปร่างยาวรีคล้ายกัน แต่เมล็ดแต่ละชนิดมีขนาดที่แตกต่างกัน สำหรับความแตกต่างในเรื่องโครงสร้างของเมล็ด เช่น โครงสร้างเมล็ดของข้าวสาลี ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนด้านสันหลัง (dorsal side) เป็นส่วนที่อยู่ติดกับเลมมา (lemma) ที่มีลักษณะโค้งเป็นสัน ส่วนอีกด้าน คือ ด้านท้อง (ventral side) ส่วนนี้จะอยู่ติดกับพาเลีย (palea) ที่มีลักษณะเป็นร่อง (crease) โดย

ที่บริเวณที่อยู่สองข้างร่องจะนูนเรียกว่าแก้ม (cheeks) ทางโคนของเมล็ดด้านสันหลังจะเป็นส่วนของคัพพะ และส่วนปลายเมล็ดทางยอดจะมีขนสั้น ๆ (beard) ติดอยู่ ซึ่งส่วนต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวสาลีแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเปลือกหุ้มผล และส่วนของเอนโดสเปิร์ม โดยส่วนของเนื้อเมล็ดประกอบด้วย เปลือกหุ้มเมล็ด ชั้นเยื่อโปร่งแสง ชั้นแอลิวโรน เอนโดสเปิร์มและคัพพะ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540) หรือในโครงสร้างของเมล็ดข้าว ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวหรือผล เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) ซึ่งประกอบด้วย เปลือกหุ้มเนื้อผล ขั้วเมล็ด และกลีบรองเมล็ด อีกส่วนคือ ส่วนเนื้อผลหรือผลแท้ซึ่งประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด เยื่อชั้นแอลิวโรน เอนโดสเปิร์ม และคัพพะ โดยส่วนของคัพพะจะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านท้อง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) เป็นต้น จากข้อมูลโครงสร้างของเมล็ดธัญพืชแต่ละชนิดทำให้สามารถนำแต่ละส่วนของเมล็ดธัญพืชมาใช้ประโยชน์ได้ อย่างเช่น การนำส่วนของคัพพะจากธัญพืชมาใช้ไม่ได้หลากหลาย เช่น งานวิจัยของ Zalatnai และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาโดยการนำส่วนคัพพะข้าวสาลีมาหมักด้วย *Saccharomyces cerevisiae* ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติในการยับยั้งสารที่ทำให้เกิดมะเร็งในลำไส้ของสัตว์ทดลอง งานวิจัยของ Beeson, Lehrer และ Woods (1947) ก็ได้ทำการศึกษาโดยการนำส่วนของคัพพะข้าวสาลีและข้าวโพดเพิ่มเติมลงในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ พบว่า หลังจากการเติมคัพพะข้าวสาลีและข้าวโพดช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของหนู แต่การนำส่วนของคัพพะมาใช้ประโยชน์ก็มีข้อด้อยเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การนำเมล็ดทั้งเมล็ดมาใช้ประโยชน์ เช่น การศึกษาของ Munter, Hu, Spiegelman, Franz และ Dam (2007) พบว่า การรับประทานเมล็ดธัญพืชในรูปเต็มเมล็ด (whole grain) ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคเบาหวานประเภท 2 ได้ในขณะที่การเพิ่มเติมส่วนของคัพพะเข้าไปไม่สามารถช่วยลดความเสี่ยงได้ เช่นเดียวกับ Jensen และคณะ (2004) ที่ทำการศึกษาเพิ่มส่วนของคัพพะและรำเป็นส่วนประกอบ พบว่า การรับประทานในรูปเต็มเมล็ดช่วยลดปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดโรคเกี่ยวกับหัวใจ และหลอดเลือดหัวใจได้ดีกว่าการเติมส่วนของคัพพะและรำลงไปเพิ่มเติม

ลูกเดือยหรือเดือย เป็นธัญพืชที่ให้คุณค่าทางด้านโภชนาการสูงเมื่อเทียบกับธัญพืชอื่น ๆ อาทิเช่น ปริมาณโปรตีน 12-15% ไขมัน 5% สตาร์ช 50-60% ไฟเบอร์ 8-10% และเถ้า 2-3% (ศิริพร จันทนา, 2529) และยังคงอุดมไปด้วยแร่ธาตุและวิตามินต่าง ๆ ดังความเชื่อของชาวจีนและญี่ปุ่นที่กล่าวไว้ว่า ลูกเดือยเป็นอาหารบำรุงสุขภาพ โดยในประเทศญี่ปุ่นมีการนำลูกเดือยทำเป็นเครื่องดื่มประเภทข้าวหมักและให้ชื่อว่า dzu ยาต้ม โจ๊ก ชาสำหรับชงดื่มและใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับหมักทำเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และมีแนวโน้มที่จะนำลูกเดือยมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ลูกเดือยยังสามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ เช่น มิโซ ซิอิ้ว แครกเกอร์ ขนมปังบิสกิต และอื่นอีกมากมาย (ศิริพร จันทนา, 2529) นอกจากนี้ในประเทศศรีลังกาได้นำเอาลูกเดือยมาใช้เป็นอาหารหลักแทนข้าวอีกด้วย (ทักษิณี พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2531) ซึ่ง

ชี้ให้เห็นว่าลูกเดือยเป็นธัญพืชที่ได้รับความนิยม และจากรายงานการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์การแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบว่า ลูกเดือยมีสารสำคัญหลายชนิดซึ่งออกฤทธิ์ทางยาต่อร่างกาย ตัวอย่างเช่น สาร coixol ที่มีฤทธิ์คลายอาการเกร็งของกล้ามเนื้อ ลดความดันโลหิต ลดระดับน้ำตาลในกระแสโลหิตและลดอุณหภูมิของร่างกาย และสาร coixenolide ที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้องอกและป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง (จรัสพรรณ ตันหยง, 2544) และจากรายงานการวิจัยของ Bao และคณะ (2005) พบว่า กลุ่มของสารจำพวกไขมันธรรมชาติที่สามารถสกัดได้จากส่วนของเอนโดสเปิร์มด้วยตัวทำละลายอะซิโตน มีฤทธิ์ด้านการเกิดมะเร็งที่ดัดอ่อนซึ่งเข้าไปยับยั้งการทำงานในระดับยีน นอกจากนี้ยังมีสารประกอบประเภทโพลีฟีนอลิกซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการเกิดริ้วรอยและการเกิดออกซิเดชันที่อวัยวะต่าง ๆ ซึ่งสารนี้ช่วยป้องกันการเริ่มต้นของการเกิดเนื้องอกเนื่องจากกระบวนการออกซิเดชันได้ (Kuo และคณะ, 2002) นอกจากนี้คุณสมบัติด้านการเกิดออกซิเดชันแล้ว ลูกเดือยยังมีคุณสมบัติเป็นฟรีไบโอติกซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณกรดไขมันสายสั้นขึ้นในลำไส้ใหญ่ (Chiang และคณะ, 2000) และยังช่วยลดปริมาณของไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดได้อีกด้วย (Tsai และคณะ, 1998)

ลูกเดือยจัดเป็นธัญพืชที่อุดมไปด้วยสารสำคัญต่าง ๆ มากมายที่มีผลต่อการบำรุงร่างกาย แต่ในด้านลักษณะทางสรีรวิทยาและโครงสร้างของเมล็ดลูกเดือยยังไม่มีการรายงานการวิจัย โดยมีเพียงการศึกษาของ Jiang, Wang, Li, Lü และ Li, (2008) ที่ได้ทำการศึกษาถึง involucre ของเมล็ดลูกเดือยสำหรับทำสร้อยคอ และความแตกต่างของขนาดของรูในเมล็ดลูกเดือย 4 พันธุ์ที่นำมาทำสร้อยคอ นอกจากนี้ จากหลายรายงานการวิจัยเกี่ยวกับลูกเดือยทั้งหมดได้กล่าวถึงสารสำคัญต่าง ๆ ในลูกเดือย อาทิเช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สาร coixol สาร coixenolide เป็นต้น ซึ่งจากรายงานวิจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง ในปัจจุบันยังไม่มีการรายงานถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของลูกเดือย 2 พันธุ์ที่สำคัญทางการค้าที่มีอยู่ในประเทศไทย และยังไม่มียุทธศาสตร์การประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดือยทั้งในรูปแบบเต็มเมล็ด และในรูปแบบของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแยกคัพพะออก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของลูกเดือย 2 พันธุ์ในประเทศไทย คือ พันธุ์เปลือกขาวและพันธุ์เปลือกดำทั้งแบบเต็มเมล็ดและแบบที่แยกส่วนของคัพพะออกไป เพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากแป้งลูกเดือยได้มากขึ้น และเพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์

### 3.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.3.1 วัสดุดิบ

ลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวซื้อจากบริษัท ยงสวัสดิ์พืชผลวังสะพุง จำกัด จังหวัดเลย ลูกเดือยพันธุ์เปลือกดำจาก บริษัท ซีซีพี นอร์ทเทิร์น จำกัด จังหวัดพะเยา เอนไซม์ porcine pancrease (P-1750) เอนไซม์ amyloglucosidase (A-7095) เอนไซม์ PGO (P-7119 : เอนไซม์ผสมระหว่างเอนไซม์ peroxidase 100 units และ glucose oxidase 500 units และสารละลายเกลือบัฟเฟอร์ (buffer salts) จากบริษัท Sigma-Aldrich Chemical (St. Louis, MO, U.S.A.) และเอนไซม์ isoamylase จากบริษัท Megazyme International Ireland Ltd. (Co. Wicklow, Ireland)

#### 3.3.2 โครงสร้างภายในของเมล็ด

เมล็ดลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวและเปลือกดำแช่ในน้ำประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดที่แช่แล้วนำมาตัดในแนวขวางและแนวยาวและย้อมด้วยสีย้อม congo red และนำไปส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope) (Nikon SMZ-2T Nikon Crop., Japan) และนำลูกเดือยที่ผ่านการตัดทั้งแนวขวางและแนวยาวทำการเคลือบทองบน stub ด้วยเครื่อง Ion sputterin device (JFC -110E, Jeol, Co.,Ltd., Japan) และนำไปส่องผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM, JSM-6400 Jeol, Co.,Ltd., Japan) ซึ่งตั้งค่าความต่างศักย์ที่ 10 กิโลโวลต์

#### 3.3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาว และเปลือกดำเต็มเมล็ดนำมาบดเป็นแป้ง ด้วยวิธีการบดแบบแห้งด้วยเครื่องบดแบบ centrifugal mill (Retsch ZM1000, Gmbh and KG, Germany) ลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ผ่านการแยกส่วนคัพพะออกด้วยมือ และนำไปบดเป็นแป้งด้วยวิธีการบดแบบแห้งด้วยเครื่องบดแบบ centrifugal mill (Retsch ZM1000, Gmbh and KG, Germany) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตร (mesh No. 60)

การสกัดสารซึ่งลูกเดือยทำตามวิธีการของ Puchongkavarin, Varavinit และ Bergthaller (2005) โดยนำแป้งที่ผ่านการแยกส่วนคัพพะออกแช่ในน้ำกลั่นในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำกลั่น (1:2) จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 10% โดยปริมาตรเพื่อปรับความเป็นกรดและด่าง (pH) เป็น 5 และนำสารละลายแป้งที่ปรับความเป็นกรดและด่างแล้วปรับอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเอนไซม์ cellulase ที่มีกิจกรรม 700 EGU/g ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งแห้งและกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับสารละลายแป้งให้มีความเป็นกรดและด่างเป็นกลางด้วย

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8% โดยน้ำหนักและนำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 4275xg เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนตะกอนที่ได้ในอัตราส่วนแบ่งค่อน้ำกลั่น (1:2) และปรับอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเอนไซม์ alkaline protease (alcalase) ที่มี activity 2.4 AU/g ปริมาณ 0.4% ปริมาตรค่อน้ำหนักแป้งแห้งและกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง และนำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 4275xg เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นแยกส่วน dark tailing layer ออกจากส่วนตะกอนและนำส่วนตะกอนที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่นและปั่นเหวี่ยง 3 รอบ สุดท้ายนำส่วนตะกอนที่ได้ (สตาร์ช) ออบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสตาร์ชที่ได้ไปบดด้วยวิธีบดแบบแห้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตร (mesh No. 60)

### 3.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดือย

ปริมาณความชื้น โปรตีน ใยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber, TDF) ใยอาหารที่ละลายไม่ได้ (insoluble dietary fiber, IDF) และใยอาหารที่ละลายได้ (soluble dietary fiber, SDF) ของแป้งลูกเดือยวิเคราะห์ด้วยวิธี AOAC (2000) การวิเคราะห์ปริมาณไขมันใช้เครื่อง 2050 Soxtec Avanti autoextraction unit (Foss Tecator, Sweden) และปริมาณสตาร์ชทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยวิธี AACC method (2000) ปริมาณอะไมโลสวิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดสีของสารประกอบอะไมโลสกับไอโอดีน ตามวิธีการของ Juliano (1971)

การวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch, RDS) แป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) และแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) วิเคราะห์ตามวิธีการของ Englyst และคณะ (1992 และ 1999) โดยชั่งตัวอย่างหนัก 400 มิลลิกรัม และกัวกัมหนัก 50 มิลลิกรัมลงในหลอดเซนทริฟิวขนาด 85 มิลลิลิตรที่มีลูกแก้วขนาด 1.5 เซนติเมตรจำนวน 5 ลูก จากนั้นเติม 0.1 โมลาร์ สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท (pH 5.2) จำนวน 20 มิลลิลิตร แล้วนำหลอดเซนทริฟิวเข้าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนานเป็นเวลา 45 นาทีพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Julabo EC, Julabo Labortechnik GMBH, Germany) จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ผสมของ porcine pancrease และ amyloglucosidase ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เมื่อครบเวลาที่ 20 และ 120 นาที ปิดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 0.4 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทริฟิวที่มีสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และให้นิยามเป็นส่วน G20 และ G120 ตามลำดับ หลังจากครบเวลา 120 นาที นำหลอดเซนทริฟิวจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส มาแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาแช่ในน้ำแข็งเป็นเวลา 20 นาทีและเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 7 โมลาร์

ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และนำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่บรรจุน้ำแข็งเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นบีบตัวอย่างปริมาตร 0.2 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทริฟิวที่มีสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (50 AGU/มิลลิลิตร) ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีพร้อมกับเขย่าอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเมื่อครบเวลาย้ายหลอดเซนทริฟิวไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำให้เย็นและเติมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 12 มิลลิลิตร ให้นิยามส่วนนี้ว่า TG (total glucose) สุดท้ายนำส่วน G20, G120 และ TG มาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 3000xg เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยสารละลายเอนไซม์ PGO วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 440 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) กำหนดปริมาณ RDS SDS และ RS ตามสูตรข้างล่าง

$$RDS = G20 \times 0.9$$

$$SDS = (G120 - G20) \times 0.9$$

$$RS = (TG - G120) \times 0.9 \text{ หรือ } RS = TG - (RDS + SDS)$$

### 3.3.5 การวิเคราะห์ antioxidant properties

#### 3.3.5.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ antioxidant properties

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หา antioxidant properties แบ่งออกเป็น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content) 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging activity และ reducing power การเตรียมตัวอย่างเตรียมโดยชั่งตัวอย่างแห้งหนัก 10 กรัมและเติมสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าอย่างต่อเนื่องในเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำสารละลายตัวอย่างแห้งกรองผ่านกระดาษกรอง whatman No.1 จากนั้นนำตะกอนตัวอย่างมาเติมสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ เขย่าอย่างต่อเนื่องและกรองอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นรวมสารละลายที่ได้จากการกรองครั้งที่ 1 และ 2 และนำไประเหยด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบสูญญากาศ (rotary evaporator, R-114S, Buchi Labortechnik AG, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสจนตัวอย่างแห้ง จากนั้นเก็บตัวอย่างแห้งที่ได้หลังจากการระเหยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยก่อนการนำมาวิเคราะห์ให้นำตัวอย่างแห้งที่ได้ละลายในสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์อีกครั้งให้ได้ความเข้มข้นของตัวอย่างที่ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



### 3.3.5.2 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการของ Marinova, Ribarova และ Atanassova (2005) ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.5.1 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร น้ำกลั่นปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร และสารประกอบ Folin-Ciocalteu's phenol ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เวลานาน 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตเข้มข้น 7% โดยปริมาตร 2 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตร หลังจากปรับปริมาตรแล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 90 นาที เมื่อครบเวลานำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) เทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid) (ในช่วงความเข้มข้นที่ 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 3.3.5.3. การวิเคราะห์ DPPH radical scavenging activity

DPPH radical scavenging activity วิเคราะห์ตามวิธีการของ Choi, Jeong และ Lee (2007) ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.5.1 ปริมาตร 1.2 มิลลิลิตรและสารละลาย DPPH ที่ละลายในสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เวลานาน 10 นาทีในความมืด จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) เทียบกับ blank (DI water) และ control (เมทิลแอลกอฮอล์) คำนวณปริมาณ DPPH radical scavenging activity ตามสูตรดังนี้

$$\text{DPPH radical scavenging activity (\%)} = \frac{[\Delta A_{517} \text{ of control} - \Delta A_{517} \text{ of sample}] \times 100}{\Delta A_{517} \text{ of control}}$$

$\Delta A_{517}$  = ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างหรือ control กับ blank ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร

### 3.3.5.4 การวิเคราะห์ reducing power

reducing power วิเคราะห์ตามวิธีการของ Choi และคณะ (2007) โดยปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.3.5.1 ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตตเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ (pH 6.6) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรและสารละลายโพแทสเซียมเพอริกไซยาไนด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปแช่ในอ่าง

ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบเวลาเติมสารละลาย trichloroacetic acid เข้มข้น 10% โดยปริมาตร ปริมาณ 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 200xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นบีบอัดสารละลายส่วนใสปริมาตร 5 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตรกับสารละลายเฟอริกคลอไรด์เข้มข้น 0.1% โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันและวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตรเทียบกับ blank (DI water) และ control (เมทิลแอลกอฮอล์) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England)

### 3.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณ coixenolide

ปริมาณ coixenolide วิเคราะห์ตามวิธีการของ Yang, Tseng, Chang, Lee และ Mau (2004) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณ 2,3-butanediol ที่ได้จากการปลดปล่อยจาก coixenolide ด้วยวิธีการ acid-catalyzed transesterification นำตัวอย่างแป้งมาสกัดไขมันออกด้วยสารละลายไดเอทิลอีเธอร์ตามวิธีการของ AOAC (2000) จากนั้นชั่งไขมันที่ได้จากการสกัดน้ำหนัก 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่และเติมสารละลายเมทานอลิก ไฮดรอกลอไรด์ (methanolic hydrochloride หรือ methanolic HCl) เข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำมา reflux ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้เย็นลงและปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายเมทานอลิกโซเดียมเมทอกไซด์ (methanolic sodium methoxide) ที่ความเข้มข้น 30% โดยปริมาตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้หลังจากการปรับให้เป็นกลางแล้ว กรองส่วนของเกล็ดที่เกิดขึ้นและปรับปริมาตรด้วยการระเหยตัวอย่างด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบสูญญากาศ (rotary evaporator, R-114S, Buchi Labortechnik AG, Switzerland) ให้เหลือ 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารมาตรฐาน 1,5-Pentanediol (Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, U.S.A.) เพื่อเป็น internal standard และนำสารละลายผสมที่ได้สุดท้ายฉีดเข้าเครื่อง gas chromatograph (GC) โดยใช้ flame ionization detector (FID) เป็น detector (Varian CP3800, Varian, Co., Ltd., Netherland) และใช้คอลัมน์ CP7420, WCOT fused silica, CP-select CB for FAME 100mx0.25mm, 0.25  $\mu$ m film thickness, Varian, U.S.A. โดยมีอุณหภูมิส่วนฉีดสาร (injector temperature) เป็น 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของสารที่เข้าคอลัมน์กับส่วนที่ระบายออก (split ratio) คือ 1 ต่อ 10 และควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ (column temperature) เริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงไว้ 20 นาที รวมระยะเวลาในการวิเคราะห์เท่ากับ 52 นาที อุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจวัด (detector temperature) เป็น 250 องศาเซลเซียส ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (injection volume) คือ 1 ไมโครลิตร จากนั้นคำนวณปริมาณ

coixenolide ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณ 2,3-butanediol โดยคำนวณเทียบกับพื้นที่พีคของ internal standard

### 3.3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชลูกเด็ย

#### 3.3.7.1 กำลังการพองตัว และการละลาย

วิเคราะห์กำลังการพองตัว (swelling power) และปริมาณการละลาย (solubility) ตามวิธีการของ Li และ Corke (1999) ซึ่งตัวอย่างจำนวน 0.3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในหลอดเซนทริฟิว และเติมน้ำกลั่นปริมาณ 15 มิลลิลิตร จากนั้นแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส พร้อมกับการเขย่าในระดับคงที่ (Ratex SWB20, Instruments PTY., LTD., Australia) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 2000xg เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นแยกส่วนใสใสในภาชนะที่ทราบน้ำหนักและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและคำนวณเป็นร้อยละการละลาย และนำตัวอย่างแป้งที่เหลือในหลอดเซนทริฟิวมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละกำลังการพองตัว

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการละลาย (\%)} &= \frac{\text{น้ำหนักแป้งส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \\ \text{กำลังการพองตัว} &= \frac{\text{น้ำหนักแป้งที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})} \end{aligned}$$

#### 3.3.7.2 คุณสมบัติการเกิดเพสต์

วิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสต์ (pasting properties) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA, Newport Scientific, Warriewood, Australia) ตามวิธีการของ Li และ Corke (1999) ซึ่งตัวอย่างจำนวน 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงใน RVA canister และเติมน้ำกลั่นลงใน RVA canister ให้มีน้ำหนักรวมทั้งหมดเป็น 28 กรัม จากนั้นผสมให้เข้ากัน และใช้โปรแกรมการทำงานด้วย standard profile 2 ดังต่อไปนี้ เริ่มต้นการทำงานที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที ด้วยความเร็ว 960 รอบต่อนาที สำหรับ 10 วินาทีแรก แล้วลดลงเป็น 160 รอบต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 1-8.5 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 13.50-21 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที รวมระยะเวลาการทดสอบ 23 นาที ทำการวัดค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าเบรคดาวน์ (breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่าเซตแบค (setback)

### 3.3.7.3 คุณสมบัติทางด้านความร้อน

ศึกษาคุณสมบัติทางด้านความร้อน (thermal properties) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimetry (DSC 7, Perkin Elmer Corporation, U.S.A.) ซึ่งตัวอย่าง 10 มิลลิกรัมลงในถ้วยสแตนเลส (stainless steel pan) และเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนน้ำหนักแห้ง 30% จากนั้นปิดฝาให้สนิทและบ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลาทีนในเซชันด้วย DSC โดยใช้ indium เป็น standard และถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็น reference และใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ 25 ถึง 125 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดลง 60 องศาเซลเซียสต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยทำการตรวจวัดเช่นเดียวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลาทีนในเซชัน ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทีนในเซชัน (onset gelatinization temperature,  $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลาทีนในเซชัน (peak gelatinization temperature,  $T_p$ ) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลาทีนในเซชัน (conclusion gelatinization temperature,  $T_c$ ) ช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลาทีนในเซชัน ( $T_c - T_o$ ) และค่าพลังงานเอนทัลปีของการเกิดเจลาทีนในเซชัน ( $\Delta H$ ) โดยใช้โปรแกรม pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, U.S.A.)

### 3.3.7.4 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) (Bruker D5005, Bruker GmbH, Germany) ด้วยรังสี  $\text{Cu K}\alpha$  1.54 Å และในการทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม Bragg's angle ( $2\theta$ ) เท่ากับ 4-30 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 รอบต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (%relative crystallinity) ตามวิธีการของ Hermans และ Weidinger (1961) วัดพื้นที่ที่ฟิตโดยใช้โปรแกรม EVA diffact plus#1 software (Bruker GmbH, Germany) ซึ่งอัตราส่วนของพื้นที่ฟิตต่อพื้นที่ทั้งหมดคิดเป็นค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity)

### 3.3.7.5 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM, JSM-6400 Jeol, Co., Ltd., Japan) โดยนำตัวอย่างโรยบน stub จากนั้นทำการเคลือบทองบน stub ที่มีตัวอย่างด้วยเครื่อง Ion sputterin device (JFC -110E, Jeol, Co., Ltd., Japan) และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่ค่าความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์

### 3.3.7.6 การวิเคราะห์ขนาดของเม็ดสตาร์ช

วิเคราะห์ขนาดของเม็ดสตาร์ชด้วยการวิเคราะห์แบบเปียก (wet analysis) นำตัวอย่างสตาร์ชใส่ลงในเครื่อง Diffraction Particle Size Analyzer (Mastersizer S, Meditop, Co., Ltd., United Kingdom) ซึ่งมีน้ำรองรับภายในเครื่องจากนั้นเครื่องจะทำการประมวลผลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ ค่าที่วัดได้ คือ ค่า D (4,3) เป็นค่าของขนาดของอนุภาคที่มีการกระจายตัวเฉลี่ยสูงสุดของการกระจายตัวทั้งหมด

### 3.3.7.7 การวิเคราะห์ขนาดสายโซ่ของอะไมโลเพคติน

วิเคราะห์ขนาดสายโซ่ของอะไมโลเพคติน (chain-length distributions) ตามวิธีการของ Govindasamy, Oates และ Wong (1993) เตรียมตัวอย่างสตาร์ช 6-7 มิลลิกรัม ในน้ำปราศจากไอออนความบริสุทธิ์สูงปริมาณ 10 มิลลิลิตร และตัดกิ่งก้านด้วยเอนไซม์ isoamylase ที่มี activity 700 unit โดยปรับสภาวะการทำงานของเอนไซม์ให้ทำงานในสภาวะที่มีโซเดียมอะซิเตรทบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ (pH 3.5) แล้วจึงบ่มสารละลายตัวอย่างทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้องหยุดปฏิกิริยาด้วยการต้มในอ่างน้ำเดือด เป็นเวลานาน 5 นาที แล้วใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดสายโซ่ของอะไมโลเพคติน (branch chain-length distributions) ด้วยเครื่อง High Performance Anion Exchange Chromatography (HPAEC) (รุ่น dionex ICS-3000, Dionex Corp., Sunnyvale, CA) โดยใช้ detector แบบ pulsed amperometric detector (PAD) กรองตัวอย่างผ่านเมมเบรนขนาด 0.2 ไมครอน (0.2 um pore size millipore filter) ก่อนฉีดเข้าคอลัมน์และควบคุมตัวอย่างที่จะทำการคัดขนาดให้มีปริมาตรเท่ากับ 20 ไมโครลิตร ใช้คอลัมน์ carbopac PA-200 เพื่อคัดแยกขนาดของสายกลูแคนและควบคุมอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ให้มีอัตราการไหลเท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ประกอบด้วย eluent A คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ และ eluent B คือ โซเดียมอะซิเตรทเข้มข้น 500 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ควบคุมให้มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เป็นองค์ประกอบในเฟสของที่ ดังนี้ นาทีที่ 0 ถึง 10 มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40% นาทีที่ 10 ถึง 20 มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 50% และนาทีที่ 20 ถึง 55 มีร้อยละสัดส่วนของ eluent

B เพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 70% และเทียบปริมาณคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลต่ำกับกราฟมาตรฐานของ น้ำตาลกลูโคส (glucose) มอลโทส (maltose) มอลโทไตรโอส (maltotriose) มอลโทเตตระโอส (maltotetraose) มอลโทเพนตะโอส (maltopentaose) มอลโทเฮกตะโอส (maltohexose) และมอลโท เฮปตะโอส (maltoheptaose) (Fluka Chemical Crop, St. Ronkonkoma, NY, U.S.A.)

### 3.3.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

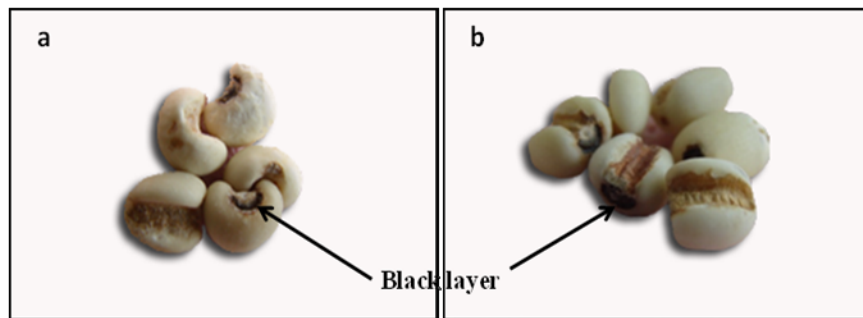
วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม statistical analysis system (SAS) for windows version 6.12 (SAS Institute Inc., Cary, NC) องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของลูกเดือย โดยใช้แผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี duncan's new multiple's range test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

## 3.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

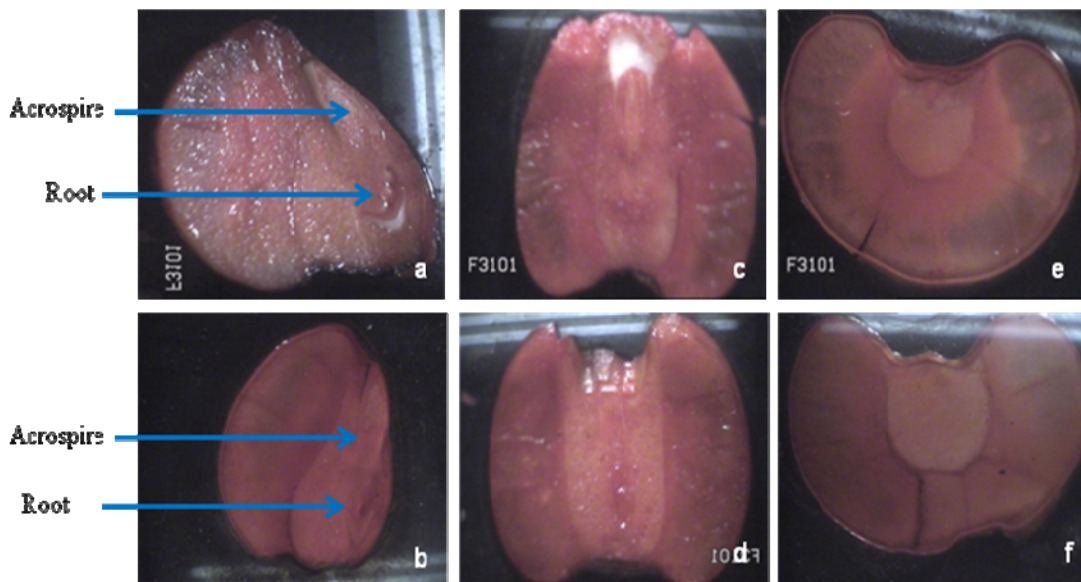
### 3.4.1 โครงสร้างของเมล็ดลูกเดือย

รูปร่างเมล็ดและโครงสร้างทางสรีรวิทยาของเมล็ดลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาว และดำ ได้ทำการ ศึกษาด้วยวิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า และการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Stereo microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) จากการ สังเกตลักษณะภายนอกของเมล็ดลูกเดือย (ภาพที่ 3.1) พบว่า ลักษณะรูปร่างของเมล็ดลูกเดือย (ภาพ ที่ 3.1 a และ b) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวสาลี (ภาคผนวก ก, ภาพที่ 1ga) และข้าวบาร์เลย์ (ภาคผนวก ก, ภาพที่ 2ga) เนื่องจากลักษณะของเมล็ดทั้ง 3 นี้มีลักษณะร่องบริเวณกลางเมล็ด เช่นเดียวกัน แม้ว่าเมล็ดลูกเดือยไม่ได้ถูกจัดแบ่งอยู่ใน tribe เดียวกันกับเมล็ดข้าวสาลีและข้าว บาร์เลย์ ซึ่งเมล็ดลูกเดือยจัดอยู่ใน tribe เดียวกับข้าวโพดและข้าวฟ่าง คือ Andropogoneae ในขณะที่ เมล็ดข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีจัดอยู่ใน tribe เดียวกัน คือ Triticeae (Shewry และคณะ, 1992) เมื่อ พิจารณาถึงขนาดของเมล็ดภายนอก พบว่า เมล็ดลูกเดือยมีขนาดของเมล็ดทั้งหมดและขนาดด้านกว้าง ของเมล็ดที่ใหญ่กว่าเมล็ดข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลี (ภาพที่ 3.1 และ ภาคผนวก ก, ภาพที่ 1ga และ 2 ga) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างภายนอกของเมล็ดลูกเดือยระหว่าง 2 พันธุ์ พบว่า เมล็ดลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวมีลักษณะเนื้อเมล็ดเป็นสีขาวและมีขนาดด้านกว้างของเมล็ดมากกว่าพันธุ์ เปลือกดำ สำหรับเมล็ดลูกเดือยพันธุ์เปลือกดำเนื้อเมล็ดมีสีเหลืองนวลมากกว่าพันธุ์เปลือกขาว (ภาพ ที่ 3.1 a และ b)

โครงสร้างทางสรีรวิทยาภายในเมล็ดลูกเดือยด้วยการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (ภาพที่ 3.2) และกล้อง SEM (ภาพที่ 3.3) ภาพที่ 3.2 แสดงถึงลักษณะทางสรีระวิทยาภายในเมล็ดลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวและดำ พบว่า รูปร่างของเมล็ดลูกเดือยทั้งแนวขวางและแนวยาวมีลักษณะของรูปร่างเมล็ดที่ใกล้เคียงกับของเมล็ดข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ (ภาคผนวก ก, ภาพที่ 1กบและ 2กบ) สำหรับตำแหน่งของคัพภะหรือเอมบริโอ (embryo) นั้น พบว่า ส่วนของคัพภะอยู่บริเวณร่องกลางของเมล็ดลูกเดือยและมีส่วนของเอนโดสเปิร์มล้อมรอบส่วนของคัพภะไว้ โดยส่วนของคัพภะต่ออยู่

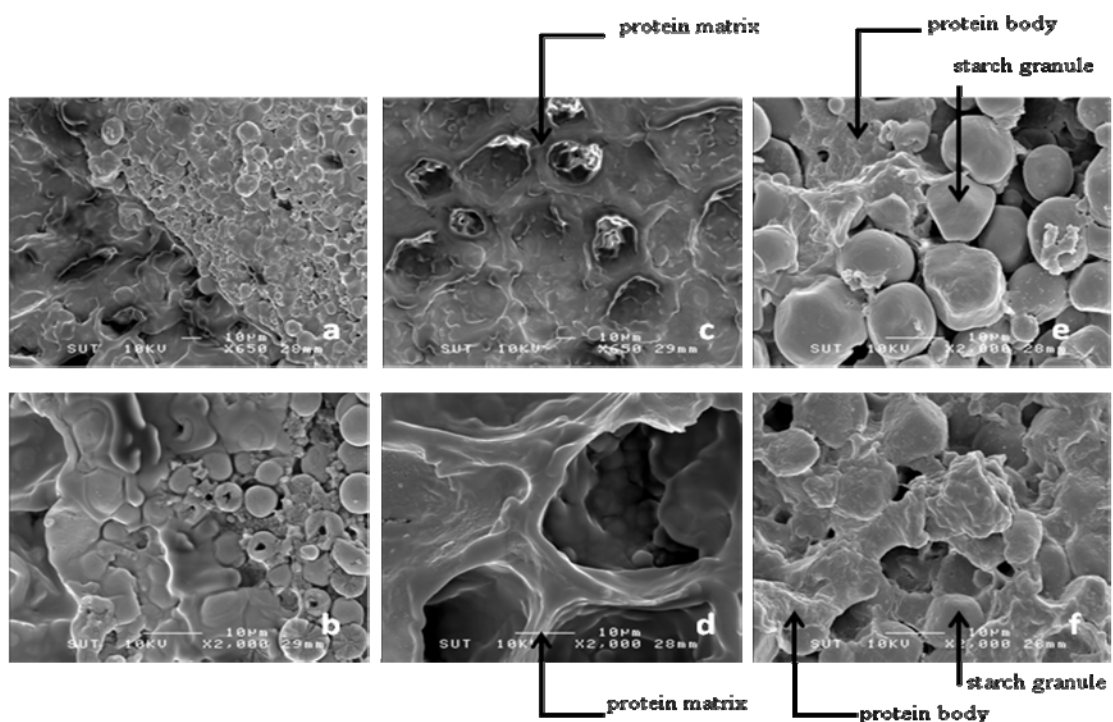


ภาพที่ 3.1 ลักษณะรูปร่างภายนอกของเมล็ดลูกเดือยพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b)



ภาพที่ 3.2 ภาพตัดขวางและภาพแนวยาวของเมล็ดลูกเดือยพันธุ์ขาว (a, c, e) และดำ (b, d, f) ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (a, b = ภาพตัดขวางทั้งเมล็ด และ c, d, e, f = ภาพแนวยาวทั้งเมล็ด)

ต่ออยู่กับส่วน black layer ซึ่งส่วน black layer เป็นส่วนของเซลล์ที่อ่อนน้ำเลี้ยงและท่อส่งอาหารที่ตายแล้วหลังจากที่เมล็ดสุกเต็มที่ โดยคัพภะของเมล็ดลูกเดือยต่ออยู่กับส่วน black layer ของเมล็ด เช่นเดียวกับเมล็ดข้าวโพด (ภาคผนวก ก, ภาพที่ 3กb) และเมล็ดข้าวฟ่าง (ภาคผนวก ก, ภาพที่ 4กb) ดังนั้น การที่ส่วนของคัพภะที่อยู่บริเวณร่องกลางในเมล็ดลูกเดือยทำให้ในระหว่างขัดสีด้วยเครื่องขัดสีแบบลูกกลิ้งจึงไม่สามารถขัดสีแยกส่วนคัพภะออกได้ เมื่อคำนวณสัดส่วนโดยประมาณของคัพภะต่อเมล็ดทั้งหมดของลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์จากภาพตัดขวางและยาวทั้ง 2 ด้าน พบว่า มีปริมาณของคัพภะอยู่ประมาณ 1 ใน 3 ของทั้งเมล็ด นอกจากนี้ในส่วนของคัพภะจากภาพตัดขวางของเมล็ดลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ (ภาพ 3.2 a และ b) สามารถสังเกตเห็นสังเกตเห็นลักษณะของใบ (acrospires) และราก (root) ที่จะเจริญเป็นต้นอ่อนต่อไป การศึกษาโครงสร้างทางสรีระวิทยาภายในของเมล็ดลูกเดือยที่ดูด้วยกล้อง SEM (ภาพที่ 3.3) พบว่า สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของลักษณะของส่วนคัพภะและเอนโดสเปิร์ม ซึ่งจะสังเกตเห็นโครงสร้างทางสรีระวิทยาภายในที่แตกต่างกันได้จากบริเวณรอยต่อระหว่างส่วนคัพภะและเอนโดสเปิร์ม (ภาพที่ 3.3 aและb) ซึ่งจากการสังเกตลักษณะของคัพภะ (ภาพที่ 3.3 c และ d) จะเห็นว่า มีลักษณะเป็นช่องของอากาศและมีลักษณะเป็นร่างแหซึ่ง



ภาพที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างภายในของเมล็ดลูกเดือย 2 พันธุ์จากกล้อง SEM (a, c, e = ลูกเดือยพันธุ์ขาว b, d, f = ลูกเดือยพันธุ์ดำ : a, b= แสดงรอยต่อระหว่างเอนโดสเปิร์มกับคัพภะ c,d= ส่วนคัพภะ e, f = ส่วนเอนโดสเปิร์ม)



คาดว่าร่างแหที่สังเกตเห็นนั้น คือ ร่างแหของโปรตีน ในขณะที่ลักษณะของเอนโดสเปิร์มประกอบด้วยเม็ดสตาร์ช (starch granule) และร่างแหของโปรตีนที่อยู่ล้อมรอบเม็ดสตาร์ช (ภาพที่ 3.3 e และ f) ซึ่งเม็ดสตาร์ชลูกเดียวนั้นมีขนาดโดยประมาณ 10-15 ไมครอน ดังนั้น เมล็ดลูกเดียวที่บริโภคนั้นโดยทั่วไปจึงยังคงมีส่วนของคัพพะ ซึ่งคัพพะของเมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่เป็นส่วนที่มีคุณค่าทางอาหารที่สำคัญ เช่น คัพพะของข้าวสาลี เป็นส่วนที่อุดมไปด้วยวิตามินต่าง ๆ มากมายโดยเฉพาะวิตามินอี และยังมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย หรือในคัพพะของข้าวบาร์เลย์ที่อุดมไปด้วยกรดไขมันที่สำคัญหลายชนิด เช่น กรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดโอเลอิก และกรดพาล์มิติก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2532) เพราะฉะนั้นการบริโภคทั้งเมล็ดของลูกเดียวจึงได้รับคุณค่าทางโภชนาการจากส่วนคัพพะด้วย

### 3.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งและสตาร์ชลูกเดียวยพันธุ์ข้าวและดำ

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดียวยพันธุ์ข้าวและดำทั้งแบบเต็มเมล็ด (whole grain flour) และที่แยกคัพพะออก (degermed flour) แสดงในตารางที่ 3.1 พบว่า ปริมาณ โปรตีน ไขมัน โยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber, TDF) โยอาหารที่ละลายไม่ได้ (insoluble dietary fiber, IDF) โยอาหารที่ละลายได้ (soluble dietary fiber, SDF) ของแป้งลูกเดียวเต็มเมล็ดพันธุ์ดำมีปริมาณมากกว่าพันธุ์ขาว ในขณะที่ปริมาณเถ้าของแป้งลูกเดียวเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวมีปริมาณมากกว่าพันธุ์ดำ โดยแป้งลูกเดียวเต็มเมล็ดพันธุ์ดำมีปริมาณโปรตีน 16.85% ไขมัน 5.35% และ เถ้า 1.17% และพันธุ์ขาวมีปริมาณโปรตีน 13.54% ไขมัน 4.86% และเถ้า 1.74 % ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Wu, Charles และ Huang (2007) ที่รายงาน ว่า ลูกเดียวจากประเทศไทย ลาว เวียดนามและไต้หวันมีปริมาณโปรตีน 12-14% ไขมัน 6.2-7.2% และเถ้า 1.7-2.4% และการศึกษาของทัศนีย์ พรกิจประสาน และ อรอนงค์ นัยวิกุล (2530) ที่รายงาน ว่า ลูกเดียวมีปริมาณโปรตีน 15% ไขมัน 5.5% และ เถ้า 1.53% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดียวกับธัญพืชอื่น ๆ แบบเต็มเมล็ด เช่น ข้าวโพด (9-13% โปรตีน 4-5% ไขมัน 1.5-2% เถ้าและ 12-13% TDF) ข้าวสาลี (14-20% โปรตีน 1.4-2.4% ไขมัน 1.7-2.4% เถ้าและ 8.8-15% TDF) และข้าวบาร์เลย์ (15-19% โปรตีน 1.8- 5.2% ไขมัน 2.0-2.5% เถ้าและ 12-21% TDF) (Grausgruber, Scheiblaue, Schönlechner, Ruckebauer และ Berghofer, 2004; Silva และ Ciocca, 2005; Hasjim, Srichuwong, Scott และ Jane, 2009) จะเห็นว่า ลูกเดียวมีปริมาณโปรตีนและเถ้าใกล้เคียงกับข้าวโพด ข้าวสาลีและข้าว บาร์เลย์ สำหรับปริมาณไขมันในลูกเดียวมีปริมาณใกล้เคียงกับข้าวบาร์เลย์และข้าวโพด แต่ปริมาณ TDF ของลูกเดียวมีปริมาณน้อยที่สุด (2-3.5%) เมื่อเทียบกับธัญพืชทั้ง 3 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดียวแบบที่แยกคัพพะออกระหว่างพันธุ์ขาวและดำ พบว่า แป้งลูกเดียวที่แยกคัพพะ

ออกพันธู์ดำมีปริมาณ โปรตีนและไขมันสูงกว่าในพันธู์ขาวแต่มีปริมาณเถ้าต่ำกว่าซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ แป้งลูกเดือยเต็มเมล็ด (ตารางที่ 3.1)

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดือยระหว่างแบบเต็มเมล็ด และแบบที่ แยกคัพพะออก พบว่า แป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกมีปริมาณ ไขมันและเถ้าน้อยกว่าแป้งลูกเดือยเต็ม เมล็ด แสดงให้เห็นว่าส่วนของคัพพะของลูกเดือยที่ถูกแยกออกไปอุดมไปด้วยปริมาณ ไขมันและเถ้า ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ปริมาณ ไขมันและเถ้าจากส่วนคัพพะของลูกเดือยพันธู์ขาวและดำ พบว่า ส่วนของ

**ตารางที่ 3.1** องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกใน พันธู์ขาวและดำ

Composition	Whole grain flour		Degermed flour	
	White(WF)	Black(BF)	White(DGWF)	Black(DGBF)
Protein (%db)	13.54±0.12 <sup>b</sup>	16.85±0.28 <sup>a</sup>	13.18±0.20 <sup>b</sup>	16.46±0.33 <sup>a</sup>
Lipid (%db)	4.86±0.14 <sup>b</sup>	5.35±0.16 <sup>a</sup>	0.91±0.02 <sup>c</sup>	1.09±0.01 <sup>c</sup>
Ash(%db)	1.74±0.02 <sup>a</sup>	1.17±0.01 <sup>b</sup>	0.59±0.02 <sup>c</sup>	0.23±0.01 <sup>d</sup>
TDF (%db)	2.14±0.04 <sup>b</sup>	3.52±0.00 <sup>a</sup>	-	-
SDF (%db)	0.63±0.01 <sup>b</sup>	1.08±0.01 <sup>a</sup>	-	-
IDF (%db)	1.51±0.05 <sup>b</sup>	2.44±0.01 <sup>a</sup>	-	-
Moisture (%)	8.05±0.11 <sup>a</sup>	7.29±0.16 <sup>b</sup>	6.92±0.11 <sup>b</sup>	8.59±0.28 <sup>a</sup>
TS (%db)	69.57±0.12 <sup>a</sup>	65.58±1.25 <sup>b</sup>	-	-
RDS (%TS)	13.99±0.25 <sup>b</sup>	16.12±0.13 <sup>a</sup>	14.66±0.25 <sup>b</sup>	15.84±0.59 <sup>a</sup>
SDS (%TS)	45.03±1.74	43.75±1.75	45.77±1.39	41.57±0.66
RS (%TS)	40.98±1.02	40.12±1.72	39.57±0.58	42.59±0.21

**หมายเหตุ** WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธู์ขาว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธู์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพพะออก พันธู์ขาว และDGBF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธู์ดำ TDF = total dietary fiber SDF = soluble dietary fiber IDF = insoluble dietary fiber TS = total starch RDS= rapidly digested starch SDS =slowly digested starch RS = resistant starch  
ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คัพภะลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณไขมัน 32.10% และพันธุ์ดำมี 36.68% และมีปริมาณเถ้า 11.40% และ 10.62% ในลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ ตามลำดับ เมื่อเทียบปริมาณไขมันและเถ้าจากส่วนคัพภะของข้าวสาลีและลูกเดือย พบว่า ปริมาณไขมันและเถ้าจากส่วนคัพภะของลูกเดือยมีปริมาณสูงกว่าคัพภะของข้าวสาลี (ไขมัน 7% และเถ้า 4.5%) (Pomeranz, 1988) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างแป้งข้าวโพดแบบเต็มเมล็ดและแบบที่แยกส่วนคัพภะออก พบว่า แป้งข้าวโพดเต็มเมล็ดมีปริมาณไขมัน 6.02% และ เถ้า 1.51% ขณะที่แป้งข้าวโพดที่แยกคัพภะออกมีปริมาณไขมัน 1.42% และเถ้า 0.2% (Houssou และ Ayemor, 2002) ดังนั้น องค์ประกอบทางเคมีที่หายไปเมื่อนำส่วนคัพภะออก คือ ไขมันและเถ้าเช่นเดียวกับในลูกเดือย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ส่วนของคัพภะของลูกเดือยที่ถูกแยกออกนั้นน่าจะเป็นส่วนที่อุดมไปด้วยกรดไขมันจำเป็น สารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายในไขมันต่าง ๆ รวมถึงแร่ธาตุด้วยเช่นเดียวกับในคัพภะของข้าวสาลีที่อุดมไปด้วยวิตามินอี (tocopherol) ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและละลายในส่วนของไขมัน (Zalatnai และคณะ, 2001) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนของแป้งลูกเดือยระหว่างแบบเต็มเมล็ดและแบบที่แยกคัพภะออก พบว่า ปริมาณโปรตีนของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดกับแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออกมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งปริมาณโปรตีนของแป้งเต็มเมล็ดและที่แยกคัพภะออกที่ไม่แตกต่างกันนั้นมีลักษณะเหมือนกับในแป้งข้าวโพด ที่มีปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวโพดเต็มเมล็ดมีปริมาณ 8.20% และในแป้งข้าวโพดที่แยกคัพภะออกมีปริมาณ 7.46% (Houssou และ Ayemor, 2002) แสดงให้เห็นว่า โปรตีนของลูกเดือยมีการกระจายทั้งในส่วนของเอนโดสเปิร์มและคัพภะในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในส่วนคัพภะของลูกเดือย พบว่า ปริมาณโปรตีนส่วนคัพภะของลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณ 14.33% และพันธุ์ดำ 14.39% นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตการกระจายของโปรตีนที่ล้อมรอบเมล็ดสตาร์ชลูกเดือยดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งการกระจายของโปรตีนของลูกเดือยมีลักษณะเช่นเดียวกับข้าวโพดที่มีการกระจายของโปรตีนล้อมรอบเมล็ดสตาร์ชและกระจายทั่วเมล็ดข้าวโพด ทั้งนี้เมล็ดข้าวโพดประกอบด้วยโปรตีนในกลุ่มโปรลามีนมากที่สุดที่มีชื่อว่า zein เช่นเดียวกับลูกเดือย ซึ่งโปรตีนโปรลามีนในลูกเดือยให้ชื่อว่า coixin (วันชัย จันทรประเสริฐ, 2537; Ottoboni และคณะ, 1990) โดยโปรตีนโปรลามีนเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายในน้ำแต่จะละลายได้ในเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 70-80 (รุ่งนภาพงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2546) และโปรตีนชนิดนี้เกิดขึ้นในส่วนโปรตีนโพลีออสโตรในขณะที่ยังมีเมล็ดกำลังเจริญเติบโตกลายเป็นกลุ่มโปรตีน (protein bodies) ทำให้เกิดการกระจายอยู่ทั่วเมล็ดและพบมากที่สุดในส่วนเอนโดสเปิร์ม (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2532)

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ในสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์ (ตารางที่ 3.2) พบว่า ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ในสตาร์ชลูกเดือยมีประมาณ 90% โดยสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมี 89.49% และพันธุ์ดำมี 89.84% ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงปริมาณโปรตีน ไขมันและเถ้าของ

สตาร์ชทั้ง 2 พันธุ์ พบว่า มีปริมาณโปรตีน ไขมันและเถ้ารวมกันไม่ถึง 1% ของสตาร์ชทั้ง 2 พันธุ์ จากนิยามของสตาร์ช คือ สตาร์ชประกอบด้วยส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่มีความบริสุทธิ์ถึง 98-99.5% และมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ไม่ถึง 1-2% (www.answer.com) จาก นิยามนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการสกัดสตาร์ชเพื่อแยกส่วนขององค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ เป็นวิธีการที่เหมาะสมและได้สตาร์ชที่บริสุทธิ์ แต่ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่ควร จะเป็นนั้น อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดที่ใช้ เอนไซม์ในการวิเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ พบว่า ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณน้อยกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชพันธุ์ดำมีปริมาณ 17.01% และพันธุ์ขาวมีปริมาณ 10.34% โดยสามารถจัดลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์อยู่ในกลุ่มพันธุ์ปกติที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (Juliano, 1979)

การแบ่งชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ RDS SDS และ RS โดยปริมาณ RDS SDS และ RS ของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ แสดงในตาราง

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์

Composition	WS	BS
Protein (%db)	0.72±0.03	0.80±0.07
Lipid (%db)	0.07±0.00	0.11±0.00
Ash(%db)	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>b</sup>
Amylose (%db)	10.34±0.12 <sup>b</sup>	17.01±0.19 <sup>a</sup>
Moisture (%)	8.42±0.63 <sup>b</sup>	10.03±0.30 <sup>a</sup>
TS (%db)	89.49±1.53	89.84±0.91
RDS (%Total starch)	10.78±0.31 <sup>b</sup>	11.80±0.43 <sup>a</sup>
SDS (%Total starch)	39.93±0.02 <sup>a</sup>	36.20±0.38 <sup>b</sup>
RS (%Total starch)	49.29±1.13 <sup>b</sup>	52.00±1.74 <sup>a</sup>

**หมายเหตุ** WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ TS = total starch

RDS= rapidly digested starch SDS =slowly digested starch RS = resistant starch

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 3.1 และ 3.2 พบว่า เมล็ดลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์มีปริมาณ RDS ประมาณ 10-16% ปริมาณ SDS ประมาณ 36-45% และปริมาณ RS ประมาณ 39-51% ซึ่งเมื่อเทียบปริมาณ RDS SDS และ RS กับ ธัญพืชอื่น ๆ อาทิเช่น สตาร์ชข้าวโพด (24.4%RDS 53.0%SDS 22.6%RS) สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว (34.5%RDS 47.6%SDS 17.8%RS) สตาร์ชข้าวสาลี (40.1%RDS 50.0%SDS 9.6%RS) (Zhang, Ao และ Hamaker, 2006) และสตาร์ชข้าว (9.83%RDS 19.71%SDS 70.46 %RS) และสตาร์ชมันฝรั่ง (6.72%RDS 22.55%SDS 70.73%RS) พบว่า ลูกเดือยมีปริมาณ RDS ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวสาลีแต่มีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวและมีค่าสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่ง สำหรับปริมาณ SDS พบว่า ลูกเดือยมีปริมาณ SDS ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวสาลีแต่มีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวและสตาร์ชมันฝรั่ง และปริมาณ RS ของลูกเดือยมีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวสาลี แต่มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวและสตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลูกเดือยมีความสามารถในการต้านการย่อยของเอนไซม์ได้สูงกว่าสตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวสาลี แต่ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวและสตาร์ชมันฝรั่ง ความแตกต่างของความสามารถในการต้านการย่อยของเอนไซม์ในลูกเดือย สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวสตาร์ชข้าวสาลีและสตาร์ชข้าวซึ่งเป็นสตาร์ชในกลุ่มโครงสร้างผลึกแบบ A จากการวิเคราะห์ด้วย XRD เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณผลึก สัดส่วนของอสัณฐานและผลึก และขนาดของเม็ดสตาร์ช โดยสตาร์ชที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กมีอัตราการย่อยของเอนไซม์สูงกว่าสตาร์ชที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ (Lehmann และ Robin, 2007) และความแตกต่างของความสามารถในการต้านการย่อยของเอนไซม์ในลูกเดือยกับสตาร์ชมันฝรั่ง เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างผลึก โดยสตาร์ชลูกเดือยมีโครงสร้างผลึกแบบ A ขณะที่สตาร์ชมันฝรั่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B ซึ่งโครงสร้างผลึกทั้ง 2 นี้มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกแบบ A มีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่นกว่าโครงสร้างผลึกแบบ B แต่ด้วยโครงสร้างผลึกแบบ A มีส่วนของ double helices สายสั้นมากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ B ซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปย่อยได้มากกว่ามีผลให้สตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A มีปริมาณ RDS และ SDS สูงกว่าแต่มีปริมาณ RS ต่ำกว่าสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B (Zhang และคณะ, 2006; Lehmann และ Robin, 2007)

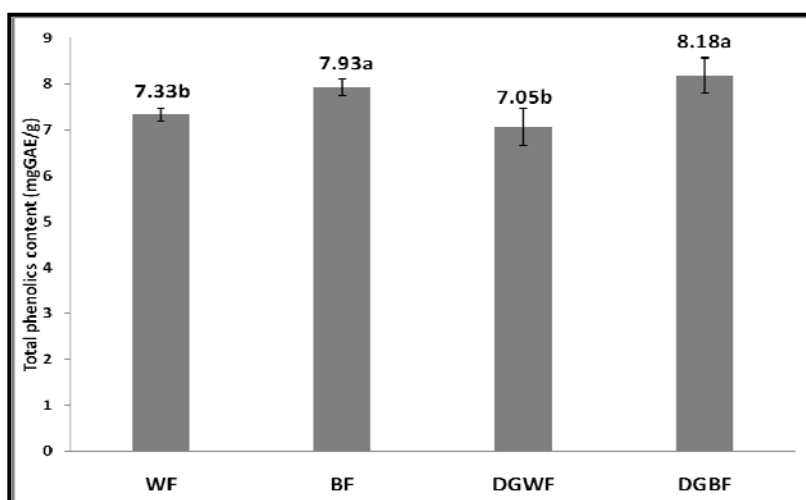
### 3.4.3 Antioxidant properties

การวิเคราะห์ antioxidant properties ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกสกัดออกพันธู์ขาวและดำ โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu เพื่อหาปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมด (total phenolic content) วิเคราะห์ radical scavenging ด้วยวิธี DPPH

assay และวิเคราะห์ reducing power ซึ่งทั้ง 2 วิธีเป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถในการรีดิวซ์ ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 3.4 3.5 และ 3.7

### 3.4.3.1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยที่แยกคัพ-ทะออกในพันธุ์ข้าวและดำแสดงในภาพที่ 3.4 ซึ่งเห็นได้ว่า ลูกเดี๋ยพันธุ์ดำมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่สูงกว่าลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวทั้งในแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยที่แยกคัพ-ทะออก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยที่แยกคัพ-ทะออก พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยที่แยกคัพ-ทะออกมีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ทั้งในลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและดำ งานวิจัยของ Tseng และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษาหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในลูกเดี๋ย พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลูกเดี๋ยที่ผ่านการขัดสี (polished adlay) มีปริมาณ 3.05 mgGAE/g ซึ่งปริมาณที่ได้มีปริมาณต่ำกว่าปริมาณที่



ภาพที่ 3.4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extract ของลูกเดี๋ยพันธุ์ขาว และดำ (WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพ-ทะออกพันธุ์ขาว และDGBF = แป้งที่แยกคัพ-ทะออกพันธุ์ดำ) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

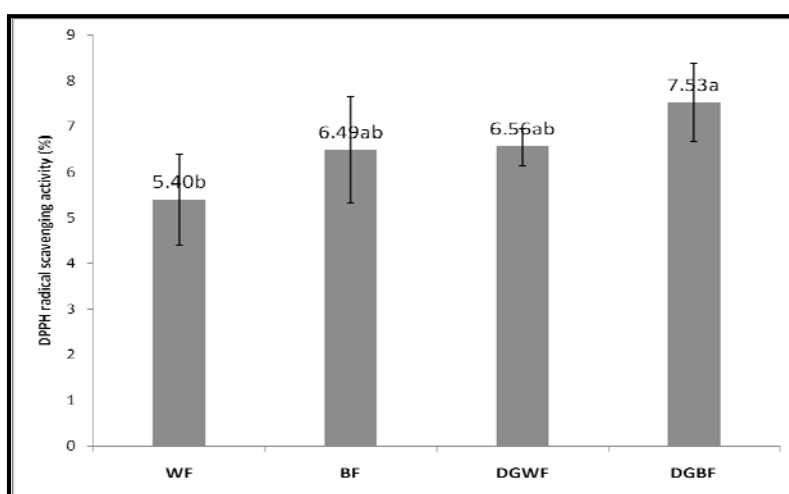
วิเคราะห์ได้ โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณ 7.33 และ 7.93 mgGAE/g ตามลำดับ นอกจากนี้งานวิจัยของ Choi และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในธัญพืชต่าง ๆ รวมทั้งลูกเดือยด้วยพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลูกเดือยมีปริมาณ 43 mgGAE/100g ซึ่งปริมาณนี้มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่วิเคราะห์ได้ในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดพันธุ์ขาว 7.33 mgGAE/g หรือ 733 mgGAE/100g และพันธุ์ดำ 7.93 mgGAE/g หรือ 793 mgGAE/100g นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Choi และคณะ (2006) เมื่อนำปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับธัญพืชอื่น ๆ พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลูกเดือยพันธุ์ขาวที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณค่าเท่ากับข้าวฟ่าง (733 mgGAE/100g) และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีปริมาณสูงกว่าธัญพืชอื่น ๆ เช่น black rice (313 mgGAE/100g) ข้าวกล้อง (brown rice) (54 mgGAE/100g) ข้าวบาร์เลย์ (50 mgGAE/100g) ถั่วเขียว (mungbean) (45 mgGAE/100g) foxtail millet (47mgGAE/100g) prosomillet (29 mgGAE/100g) และข้าวเจ้า (white rice) (18 mgGAE/100g) ซึ่งความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นเกิดได้จากหลากหลายสาเหตุ เช่น พันธุ์ ชนิดของธัญพืช องค์ประกอบทางเคมี (Maisuthisakul, Pasuk และ Ritthiruangdej, 2008)

### 3.4.3.2 DPPH radical scavenging activity

DPPH radical scavenging activity ต่อน้ำหนักตัวอย่าง methanolic extract 1 มิลลิกรัมของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออกพันธุ์ขาวและดำ แสดงในภาพที่ 3.5 พบว่า ลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมี DPPH radical scavenging activity ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ทั้งในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออก เมื่อเปรียบเทียบ DPPH radical scavenging activity ระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออกของพันธุ์ขาวและดำ พบว่า แป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออกมี DPPH radical scavenging activity ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ทั้งในพันธุ์ขาวและดำ แสดงให้เห็นว่าสารประกอบที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระทั้งในส่วนของเอนโดสเปิร์ม และคัพภะมีความสามารถที่ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า ในงานวิจัยของ Tseng และคณะ (2006) ที่ทำการศึกษหา DPPH radical scavenging activity ในลูกเดือย พบว่า DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยที่ผ่านการขัดสีมีปริมาณ 6.2% ซึ่งปริมาณที่ได้มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่วิเคราะห์ได้ในลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ โดย DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณ 5.40% และ 6.49% ตามลำดับ และงานวิจัย Tseng และคณะ (2006) นี้

ยังมีการศึกษาหา DPPH radical scavenging activity ในข้าวที่ผ่านการขัดสี (polished rice) ด้วย โดย DPPH radical scavenging activity ในข้าวที่ผ่านการขัดสีมีค่า 10.5% ซึ่ง DPPH radical scavenging activity ที่ได้มีค่าสูงกว่า DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำที่วิเคราะห์ได้ นอกจากนี้ Choi และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษา DPPH radical scavenging activity ในธัญพืชต่าง ๆ รวมทั้งลูกเดือยด้วย พบว่า DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยมีค่า 5% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำที่วิเคราะห์ได้ และเมื่อเปรียบเทียบ DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำกับธัญพืชอื่น ๆ ก็พบว่า DPPH radical scavenging activity ของ black rice ข้าวฟ่าง ข้าวกล้อง และข้าวบาร์เลย์มีค่าสูงกว่า DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำที่วิเคราะห์ได้ ในขณะที่ DPPH radical scavenging activity ของข้าวเจ้า ถั่วเขียว foxtail millet และ prosomillet มีค่าต่ำกว่า DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำที่วิเคราะห์ได้

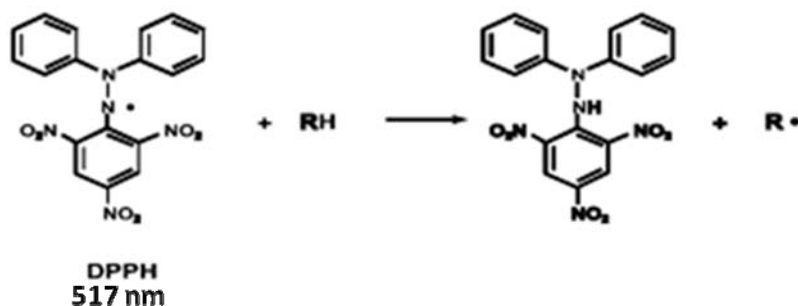
การวิเคราะห์ด้วย DPPH assay เป็นวิธีการวิเคราะห์โดยการวัดสีของอนุมูล DPPH• ที่หายไปเนื่องจากการได้รับอะตอมไฮโดรเจนจากสารต้านอนุมูลอิสระ (antiradical) ตามสมการดัง



ภาพที่ 3.5 DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำ (WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ข้าว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพภะออกพันธุ์ข้าว และDGBF = แป้งที่แยกคัพภะออกพันธุ์ดำ) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



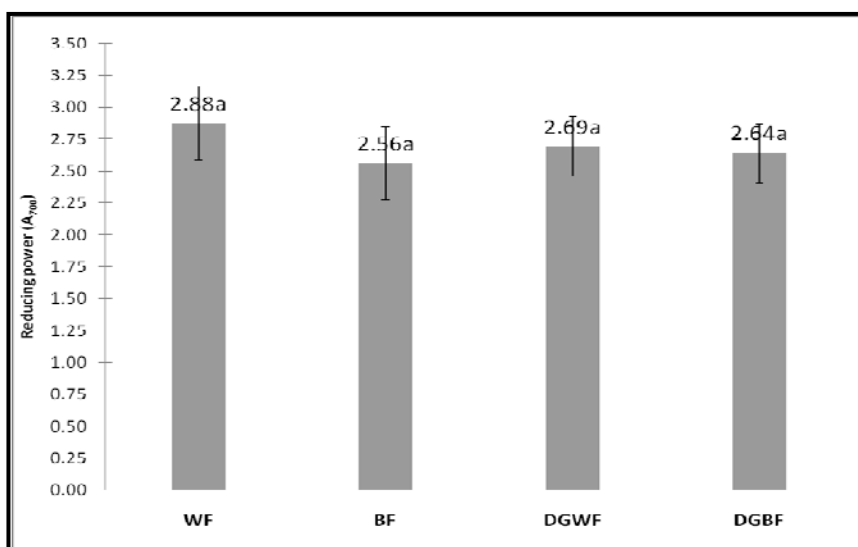
ภาพที่ 3.6 (Prakash, 2001) จากภาพนี้ แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของสีของอนุมูล DPPH• เกิดจากการรับอะตอมไฮโดรเจนจากสารต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้น ความแตกต่างของ DPPH radical scavenging activity ของสารสกัดที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรขึ้นกับปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนที่ได้รับจากสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งการรับไฮโดรเจนอะตอมสามารถมาได้จากหลายทาง โดยทางหนึ่งที่เป็นไปได้ คือ การได้รับจากโมเลกุลของสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Butsat และ Siriamornpun (2010) รายงานว่า ความแตกต่างของ DPPH radical scavenging activity ในแต่ละส่วนของเมล็ดข้าว (รำ เปลือก ข้าวกล้องและแป้งข้าว) ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก Morismta, Harai, Sudai และ Tetsukai (2002) ก็พบว่า DPPH radical scavenging activity ในเมล็ด buckwheat มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออกในพันธุ์ขาวและดำที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันเล็กน้อย (ประมาณ 1%) แม้ว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเฉลี่ยของลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าลูกเดือยพันธุ์ขาว ส่งผลให้ DPPH radical scavenging activity เฉลี่ยของลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาวเล็กน้อย สำหรับ DPPH radical scavenging activity เฉลี่ยในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดที่มีค่าน้อยกว่าแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะออก เนื่องจากปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดมีปริมาณน้อยกว่าแป้งลูกเดือยที่แยกคัพภะเช่นกัน



ภาพที่ 3.6 สมการการรับอะตอมไฮโดรเจนของอนุมูล DPPH• จากสารต้านอนุมูลอิสระ  
ที่มา: Prakash (2001)

### 3.4.3.3 Reducing power

reducing power ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกในพันธุ์ข้าวและดำที่ความเข้มข้นของตัวอย่าง methanolic extract ต่อสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ที่ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงในภาพที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า ลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำมีค่า reducing power เกลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ทั้งในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก เมื่อเปรียบเทียบค่า reducing power ระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกของ พันธุ์ข้าวและดำ พบว่า แป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกมีค่า reducing power เกลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ทั้งในพันธุ์ข้าวและดำ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า reducing power ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า จากงานวิจัยของ Tseng และคณะ (2006) พบว่า ค่า reducing power ของลูกเดือยที่ขัดสีและลูกเดือยกล้าง (dehulled adlay) มีค่า 0.73 และ 0.86 ตามลำดับ โดยค่า reducing power ของลูกเดือยที่ขัดสีและลูกเดือยกล้างมีค่าต่ำกว่าค่า reducing power ของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้พันธุ์ข้าว (2.88) และดำ (2.56) นอกจากนี้ เมื่อเทียบค่า reducing power ของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้กับข้าวที่ขัดสีในงานวิจัยของ Tseng และคณะ (2006)



ภาพที่ 3.7 reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำ (WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ข้าว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ข้าว และDGBF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ดำ) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

พบว่า ค่า reducing power ของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้พันธุ์ขาว (2.88) และดำ (2.56) มีค่าสูงกว่าค่า reducing power ของข้าวที่ขัดสี (0.38) อีกหนึ่งงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาหาค่า reducing power ในธัญพืชต่าง ๆ รวมถึงลูกเดือยด้วย พบว่า ค่า reducing power ของลูกเดือย (0.125) มีค่าต่ำกว่าค่า reducing power ของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้พันธุ์ขาว (2.88) และดำ (2.56) และเมื่อเทียบค่า reducing power ของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้กับธัญพืชอื่น ๆ พบว่า ค่า reducing power ของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวบาร์เลย์แต่มีค่าต่ำกว่าค่า reducing power ในข้าวฟ่างและ black rice และมีค่าสูงกว่า ข้าวกล้อง ข้าวเจ้า ถั่วเขียว foxtail millet และ prosomillet (Choi และคณะ, 2006)

การวิเคราะห์ค่า reducing power เป็นวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ ferric-ferricyanide complex ไปเป็นรูป ferrous-ferricyanide complex ซึ่งขึ้นกับสารต้านอนุมูลอิสระโดยในงานวิจัยของ Choi และคณะ (2006) รายงานว่า ค่า reducing power มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกที่ได้จากตัวอย่างมีผลต่อการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเพื่อการเปลี่ยนโครงสร้างของ ferric เป็น ferrous ซึ่งแม้ว่าในงานวิจัยของ Choi และคณะ (2006) พบว่า ค่า reducing power มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แต่จากการวิเคราะห์ของค่า reducing power ในลูกเดือย พบว่า ค่า reducing power ในลูกเดือยไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ค่า reducing power ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีในตัวอย่งนั้น ๆ เพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นกับความสามารถของการรีดิวซ์ของสารนั้นด้วย ซึ่งการที่ค่า reducing power ระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกหรือระหว่างลูกเดือยพันธุ์ขาว และดำที่ไม่แตกต่างกันขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการรีดิวซ์ของสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในแป้งแต่ละชนิดและแต่ละพันธุ์

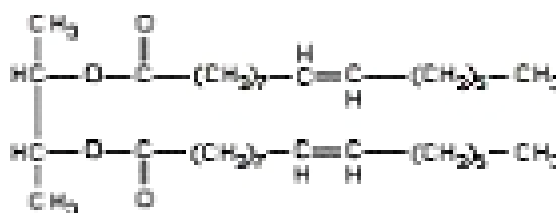
#### 3.4.4 ปริมาณ coixenolide

ตารางที่ 3.4 แสดงปริมาณ coixenolide ในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาวและดำ จากตารางพบว่า แป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวและดำมีปริมาณ coixenolide เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกพบว่า แป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดมีปริมาณ coixenolide น้อยกว่าในแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกเฉพาะในลูกเดือยพันธุ์ขาว ในขณะที่แป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกของพันธุ์ดำไม่สามารถวิเคราะห์ได้ ซึ่งงานวิจัยของ Chang และ But (1987) ได้ทำการศึกษาหาปริมาณ coixenolide ในลูกเดือยเช่นกัน พบว่า ปริมาณ coixenolide ที่พบได้ในเมล็ดลูกเดือยมีปริมาณไม่มากกว่า 0.25% ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปริมาณ coixenolide ที่สามารถพบได้ในลูกเดือยมีปริมาณน้อยมาก และจากการวิเคราะห์ปริมาณ coixenolide ในลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ที่ได้ก็ แสดงให้เห็นว่าในลูกเดือยมีปริมาณ coixenolide น้อยมาก

ตารางที่ 3.4 ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออกพันธุ์ข้าวและดำ

sample	Coixenolide content (ug/g)
WF	0.02 ± 0.02
BF	0.02 ± 0.03
DGWF	0.53 ± 1.04
DGBF	nd

**หมายเหตุ** WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ข้าว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ข้าว และDGBF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ดำ  
nd = ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (not detective)



ภาพที่ 3.8 โครงสร้างของสารประกอบ coixenolide  
ที่มา: Dharamanada (2007)

ซึ่งอาจจะต้องการวิธีการแปรรูปบางอย่างเข้ามาช่วยทำให้สารประกอบ coixenolide หลุดออกจากโครงสร้างของไขมัน เนื่องจากโครงสร้างของสารประกอบ coixenolide เป็น di-glyceride ดังภาพที่ 3.8

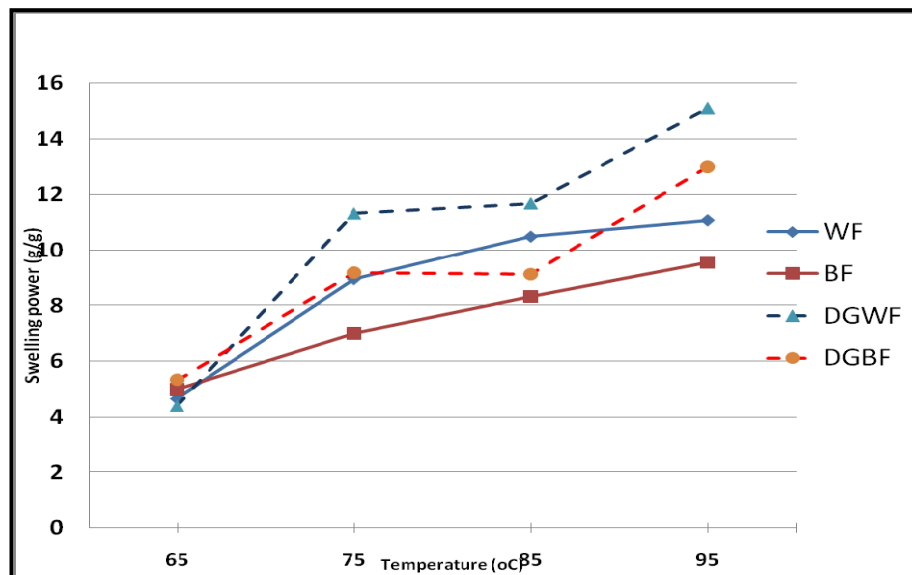
### 3.4.5 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออก

#### 3.4.5.1 กำลังการพองตัวและการละลาย

กำลังการพองตัว (swelling power) ของแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์แสดงในภาพที่ 3.9 พบว่า กำลังการพองตัวของแป้งลูกเดี๋ยยมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียสกำลังการพองตัวของแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ด และแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ทั้งนี้เป็นผลมาจากลูกเดี๋ยยพันธุ์ขาวมี ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี คือ โปรตีน และไขมัน ที่น้อยกว่าลูกเดี๋ยยพันธุ์ขาว ซึ่งโปรตีนและ ไขมันมีผลในการขัดขวางการพองตัวของเมล็ดแป้ง ซึ่งกำลังการพองตัวของลูกเดี๋ยยพันธุ์ขาวที่สูงกว่า พันธุ์ดำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hamaker และ Griffin (1993); Yang และ Chang (1999) ที่ รายงานว่า โปรตีนในแป้งข้าวเจ้ามีผลต่อการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชและทำให้ความหนืดของระบบ ลดลง ซึ่งเมื่อนำโปรตีนออกก็มีผลให้แป้งข้าวเจ้ามีการพองตัวได้มากขึ้นและทำให้ค่าความหนืดของแป้ง มีค่าเพิ่ม ขึ้นด้วย ดังนั้น การที่ลูกเดี๋ยยพันธุ์ขาวจึงมีกำลังพองตัวสูงกว่าพันธุ์ดำเพราะลูกเดี๋ยยพันธุ์ ขาวมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าพันธุ์ดำ นอกจากนี้เรื่องของโปรตีนแล้วยังมีผลมาจากเรื่องของอะไมโลส และไขมันที่มีต่อกำลังการพองตัวของเมล็ดแป้งด้วย ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 2 นี้สามารถจับกันและเกิด เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) ที่มีผลต่อความแข็งแรง ของเมล็ดแป้ง โดยลูกเดี๋ยยพันธุ์ดำมีปริมาณของไขมันและอะไมโลสสูงกว่าพันธุ์ขาว ส่งผลให้เกิด สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไขมันได้ในปริมาณที่มากกว่า มีผลให้ความแข็งแรงของเมล็ด แป้งมีค่าสูงกว่า ซึ่งมีผลไปขัดขวางการพองตัวของเมล็ดแป้งจึงทำให้กำลังการพองตัวของลูกเดี๋ยย พันธุ์ดำมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ขาว (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) แต่อย่างไรก็ตาม ไขมันที่สามารถจะมารวมตัวกับอะไมโลสได้ต้องเป็นไขมันในรูปกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) แต่ว่าไขมันที่กระจายตัวอยู่ในเมล็ดส่วนใหญ่เป็นไขมันที่อยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ (tri-glyceride) ดังนั้น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไขมันจึงเป็นส่วนน้อยที่มีผลต่อการพองตัว ของเมล็ดแป้ง แต่การพองตัวของเมล็ดแป้งได้รับอิทธิพลมาจากส่วนของไขมันที่กระจายตัวอยู่ในเมล็ด ซึ่งมีส่วนในการเคลือบบนเมล็ดสตาร์ช (starch granule) ส่งผลทำให้น้ำที่จะแทรกเข้าไปในเมล็ด สตาร์ชเพื่อให้เกิดการพองตัวเป็นไปได้ยากมากขึ้น จึงส่งผลให้มีกำลังการพองตัวที่ต่ำลง ซึ่งเป็นอีก เหตุผลหนึ่งที่กำลังการพองตัวของลูกเดี๋ยยพันธุ์ดำมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ขาว เมื่อเทียบกำลังการพองตัว ระหว่างแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ดกับแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออกทั้งในพันธุ์ดำและขาว พบว่า แป้งลูก เดี๋ยยที่แยกคัพพะออกมีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ดทั้ง 2 พันธุ์ ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออกมีปริมาณไขมันน้อยกว่าแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ด โดยไขมันมี ผลต่อการจับกับอะไมโลสเพื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมัน ซึ่งมีผลต่อความ แข็งแรงของเมล็ดแป้ง ส่งผลให้แป้งที่มีไขมันน้อยกว่ามีความแข็งแรงของเมล็ดแป้งน้อยกว่าซึ่งทำให้ เมล็ดแป้งเกิดการพองตัวที่อิสระมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลจากปริมาณของไขมันที่เคลือบบนเมล็ด สตาร์ชด้วย ซึ่งแป้งลูกเดี๋ยยที่แยกคัพพะออกมีปริมาณของไขมันที่เคลือบบนเมล็ดสตาร์ชน้อยกว่า จึง ทำให้โมเลกุลน้ำสามารถที่จะแทรกเข้าไปในเมล็ดสตาร์ชได้ง่ายมากกว่าแป้งแป้งลูกเดี๋ยยเต็มเมล็ด ส่งผล ให้เกิดการพองตัวได้สูงขึ้น ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังการพองตัวทั้งใน

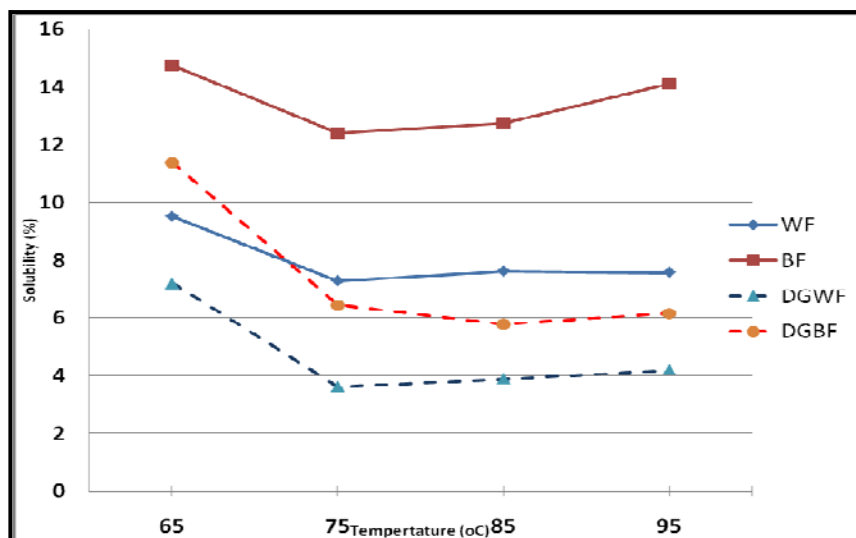
แป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกทั้ง 2 พันธุ์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 75 องศาเซลเซียสเป็นช่วงอุณหภูมิที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไนเซชันและเป็นช่วงอุณหภูมิที่โปรตีนในธัญพืชเกิดการสูญเสียสภาพ ส่งผลให้เมล็ดแป้งสามารถพองตัวได้อย่างอิสระ มีผลให้แป้งมีกำลังการพองตัวสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3.9 กำลังการพองตัวของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์ (WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาว และ DGBF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ดำ)

ค่าการละลาย (solubility) ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาวและดำมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งการค่าการละลายมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากโปรตีนภายในเมล็ดแป้งเกิดสูญเสียสภาพเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการคลายตัวออก ส่งผลให้โปรตีนมีโอกาสในการจับกับอะไมโลสได้มากขึ้นกลายเป็นสารประกอบระหว่างโปรตีนกับอะไมโลส (protein-amylose complex) ซึ่งมีผลต่อปริมาณอะไมโลสและโปรตีนที่ละลายออกมาได้มีปริมาณลดน้อยลง จึงทำให้ค่าการละลายของของแข็งในน้ำมีค่าลดลง (Hamaker และ Griffin, 1990; Pomeranz, 1991) เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของแป้งลูกเดือยระหว่างพันธุ์ขาวและดำ พบว่า ค่าการละลายของแป้งลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าในพันธุ์ขาวทั้งในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก ซึ่งความแตกต่างของค่าการละลายระหว่างพันธุ์ลูกเดือย อาจเนื่องจาก พันธุ์ดำมีปริมาณอะไมโลส โปรตีนและไขมันที่สูงกว่าพันธุ์ขาว

โดยค่าการละลายวัดได้จากปริมาณของของแข็งที่สามารถละลายได้ในน้ำ ซึ่งอะไมโลสและโปรตีนสามารถที่จะหลุดออกจากโครงสร้างของเม็ดแป้งได้จากแรงที่ให้อันระหว่างชั้น ตอนการแช่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยอะไมโลสสามารถหลุดออกจากส่วนออสซิลลูมจากบางส่วนของเม็ดแป้งที่เกิดการพองตัว (Simi และ Abraham, 2008) โดยองค์ประกอบทั้ง 3 นี้ของลูกเดือยพันธุ์ดำที่มีปริมาณมากกว่าจะมีโอกาสการหลุดออกจากโครงสร้างมากกว่าพันธุ์ขาว ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของของแข็งที่ละลายในน้ำของลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดกับแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก พบว่า ค่าการละลายของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดมีค่าสูงกว่าแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก เนื่องจากองค์ประกอบของเส้นใยและไขมันในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดมีปริมาณสูงกว่าแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก ส่งผลให้เส้นใยหรือแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถละลายในน้ำได้มากกว่ามีผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าสูงกว่า และส่วนของไขมันที่แขวนลอยในน้ำที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งจากทั้ง 2 ส่วนนี้ส่งผลให้ค่าการละลายของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดมีค่าสูงกว่าแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก



ภาพที่ 3.10 ค่าการละลายของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์ (WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาว และ DGBF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ดำ)

### 3.4.5.2 คุณสมบัติการเกิดเพสท์

คุณสมบัติการเกิดเพสท์ (pasting properties) ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาวและดำทำการทดสอบด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

แสดงในตารางที่ 3.5 คุณสมบัติการเกิดเพสท์ระหว่างพันธุ์ของลูกเดือยในแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก พบว่า ลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าเบรคดาวน์ (breakdown) และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) สูงกว่าลูกเดือยพันธุ์ดำ แต่ให้ค่าเซตแบค (setback) และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ (pasting temperature) ของลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าลูกเดือยพันธุ์ขาว ซึ่งคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำที่แตกต่างกันเนื่องจากลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณอะไมโลส โปรตีน และไขมันที่ต่ำกว่าลูกเดือยพันธุ์ดำ โดยผลของอะไมโลสต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์สามารถอธิบายได้จากงานวิจัยของ Sang, Bean, Seib, Pedersen และ Shi (2008) ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาρχข้าวฟ่างที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน พบว่า สตาρχข้าวฟ่างที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำให้ค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าในสตาρχข้าวฟ่างที่มีปริมาณอะไมโลสสูง แต่ผลของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ให้ผลในทางตรงกันข้าม และงานวิจัยของ Varavinit, Shobsngob, Varayanond, Chinachoti และ Naivikul (2003) ได้รายงานไว้ว่า ธัญพืชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจะให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ที่สูงกว่าธัญพืชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง แต่ให้ผลของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ผลในทางตรงกันข้าม ซึ่งปริมาณอะไมโลสมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว โดยธัญพืชที่มี

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก 2 พันธุ์

Sample	Pasting parameter (RVU)					Pasting Temperature (°C)
	Peak viscosity	Trough viscosity	Break down	Final viscosity	Setback	
WF	54.25± 0.88 <sup>b</sup>	50.50± 0.58 <sup>b</sup>	3.75± 0.33 <sup>c</sup>	64.31±0.99 <sup>c</sup>	13.80±0.41 <sup>d</sup>	77.02± 0.28 <sup>c</sup>
BF	19.75±1.34 <sup>d</sup>	18.42±1.15 <sup>d</sup>	1.33±0.22 <sup>d</sup>	41.08± 0.87 <sup>d</sup>	22.67±0.36 <sup>c</sup>	93.12± 0.40 <sup>a</sup>
DGWF	86.31±1.23 <sup>a</sup>	74.28±1.40 <sup>a</sup>	12.03±0.24 <sup>a</sup>	103.13±0.56 <sup>a</sup>	29.03±0.86 <sup>b</sup>	75.95± 0.35 <sup>d</sup>
DGBF	48.56±0.73 <sup>c</sup>	43.20±0.69 <sup>c</sup>	5.36±0.10 <sup>b</sup>	79.50±1.22 <sup>b</sup>	36.30±0.54 <sup>a</sup>	88.87±1.18 <sup>b</sup>

หมายเหตุ WF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาว BF = แป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ดำ DGWF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ขาว และDGBF = แป้งที่แยกคัพพะออกพันธุ์ดำ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ปริมาณอะไมโลสต่ำมีกำลังการพองตัวที่ดีกว่าในชั้นพีชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งการที่มีกำลังการพองตัวที่ดีกว่ามีผลทำให้ปริมาณน้ำอิสระรอบ ๆ เม็ดสตาร์ชลดน้อยลงทำให้ความหนืดทั้งระบบมีค่าสูงกว่า ซึ่งจากงานวิจัยของ Sang และคณะ (2008); Varavinit และคณะ (2003) สอดคล้องกับผลของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสที่แตกต่างกัน โดยลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าพันธุ์ดำและให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่สูงกว่า แต่อุณหภูมิการเกิดเพสท์ต่ำกว่าพันธุ์ดำเช่นกัน นอกจากนี้เรื่องของปริมาณอะไมโลสแล้ว อะไมโลสยังสามารถจับกับไขมันทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมัน ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดแป้ง ดังนั้น แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำโอกาสการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้ก็มีโอกาสที่ต่ำกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง รวมทั้งแป้งที่มีอะไมโลสต่ำแล้วยังมีปริมาณไขมันต่ำด้วย โอกาสการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนย่อมมีโอกาสดำ เพราะฉะนั้น แป้งที่มีปริมาณอะไมโลส หรือไขมันที่ต่ำสามารถที่จะพองตัวได้ดีกว่า มีผลให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่สูงกว่า แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสหรือไขมันสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของลูกเดือยพันธุ์ขาวที่มีปริมาณอะไมโลสและไขมันต่ำกว่าพันธุ์ดำซึ่งให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ นอกจากนี้ องค์ประกอบของโปรตีนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ด้วย เนื่องจากโปรตีนมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดแป้ง และการพองตัวของเม็ดแป้งด้วย ซึ่งแป้งที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีการพองตัวของเม็ดแป้งที่ช้ากว่าแป้งที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ ส่งผลทำให้โปรไฟล์ความหนืดมีค่าลดลง (Shimelis, Meaza และ Rakshit, 2006; กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และในงานวิจัยของ Hamaker และ Griffin (1993) และ Yang และ Chang (1999) รายงานว่า โปรตีนในแป้งข้าวเจ้ามีผลด้านการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและทำให้ความหนืดของระบบลดลง ซึ่งการนำโปรตีนออกมีผลให้ค่าความหนืดของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืด โดยเฉพาะค่าความหนืดสูงสุดที่ได้ของลูกเดือยพันธุ์ขาวที่สูงกว่าพันธุ์ดำที่มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าพันธุ์ขาว เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการเกิดเพสท์ระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกทั้งพันธุ์ขาวและดำ พบว่า แป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกมีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ค่าเบรคดาวน์ ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบคสูงกว่าแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดทั้ง 2 พันธุ์ แต่อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกมีค่าต่ำกว่าแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ด ทั้งนี้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดที่มีค่าน้อยกว่าแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก อาจเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณไขมันที่แตกต่างกันระหว่างแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออก โดยแป้งลูกเดือยที่แยกคัพพะออกมีปริมาณไขมันน้อยกว่าแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ด ซึ่งไขมันมีผลต่อการจับกับอะไมโลสและได้เป็น

สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมันที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โอกาสการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในแป้งลูกเดี๋ยที่แยกคัพออกมีน้อยกว่าแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ด จึงทำให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดมีค่าสูงกว่าแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ด ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น

### 3.4.5.3 คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization properties) ของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธุ์ขาวและดำทำการศึกษาด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) แสดงในตารางที่ 3.6 คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ได้แก่ onset temperature ( $T_0$ ) peak temperature ( $T_p$ ) completion temperature ( $T_c$ ) และค่า enthalpy ( $\Delta H$ ) ซึ่งค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$  และ  $\Delta H$  ของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่ช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ( $T_c - T_0$ ) ของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธุ์ขาวและดำไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธุ์ขาวมีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 68.25, 75.34, 82.07, 13.82 องศาเซลเซียสและ 6.72 (J/g) ตามลำดับ และแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธุ์ดำมีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 63.70, 71.27, 78.49, 14.79 องศาเซลเซียส และ 5.03 (J/g) ตามลำดับ คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดทั้ง 2 พันธุ์ที่แตกต่างกันเกิดเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณองค์ประกอบทางเคมี เช่น ปริมาณโปรตีน ไขมัน และอะไมโลส เป็นต้น โดยแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวมีปริมาณอะไมโลส โปรตีน และไขมันต่ำกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งโปรตีนและไขมัน มีผลทำให้การ

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธุ์ขาวและดำ

Sample	Thermal transition parameters				
	$T_0$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_c - T_0$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
WF	$68.25 \pm 0.09^a$	$75.34 \pm 0.02^a$	$82.07 \pm 0.08^a$	$13.82 \pm 0.13$	$6.72 \pm 0.23^a$
BF	$63.70 \pm 1.50^b$	$71.27 \pm 0.36^b$	$78.49 \pm 0.68^b$	$14.79 \pm 2.01$	$5.03 \pm 1.07^b$

**หมายเหตุ**  $T_0$  = gelatinization onset temperature  $T_p$  = gelatinization peak temperature  $T_c$  = gelatinization completion temperature  $T_c - T_0$  = gelatinization temperature range และ  $\Delta H$  = Enthalpy WF = แป้งเต็มเม็ดพันธุ์ขาว และ BF = แป้งเต็มเม็ดพันธุ์ดำ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

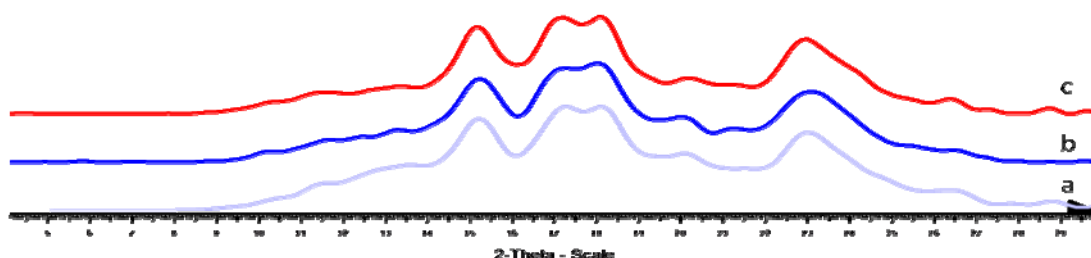
พองตัวของเม็ดสตาร์ชเกิดได้ช้า ขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ชและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างของโมเลกุล ส่งผลทำให้ต้องใช้พลังงานในการทำลายพันธะต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมากขึ้นหรือคือส่งผลให้อุณหภูมิที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง DSC มีปริมาณสูงขึ้น (Sasaki, Yasui และ Matsuki, 2000) แต่จากการวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งลูกเดี๋ยพันธ์ข้าวและคำพบว่า ให้ผลในทางตรงข้ามกับผลที่ควรจะได้รับ คือ คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันในพันธ์ข้าว น่าจะมีค่าน้อยกว่าพันธ์ดำ แต่กลับให้คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันในพันธ์ข้าวมีค่าสูงกว่าพันธ์ดำ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นคาดว่าน่าจะมาจากผลขององค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ทำงานร่วมกันทำให้ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันที่ได้ของทั้ง 2 พันธ์มีผลในทางตรงกันข้ามกับที่ควรจะเป็น นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณผลึก ซึ่งปริมาณผลึกในสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธ์ข้าวมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธ์ดำ มีผลให้ต้องใช้พลังงานในการทำลายโครงสร้างผลึกในลูกเดี๋ยพันธ์ข้าวสูงกว่าพันธ์ดำ ทำให้คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งลูกเดี๋ยพันธ์ข้าวมีค่าสูงกว่าพันธ์ดำ ซึ่งจากงานวิจัยของ Singh, Singh, Kaur, Sodhi และ Gill (2003) รายงานว่า สตาร์ชที่มีปริมาณผลึกสูงจะให้โครงสร้างที่แข็งแรงและเสถียรสูง ซึ่งมีผลให้เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการต้านความร้อนได้สูง จึงให้คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันสูง ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันในแป้งลูกเดี๋ยพันธ์ข้าวที่มีค่าสูงกว่าพันธ์ดำ นอกจากนี้ปัจจัยในเรื่องของอะไมโลเพกตินยังมีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันด้วย เนื่องจากอะไมโลเพกตินมีผลหลักต่อปริมาณสัดส่วนระหว่างส่วนของโครงสร้างอสังฐานกับโครงสร้างผลึกของสตาร์ช โดยสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีส่วนของโครงสร้างอสังฐานมากกว่าส่วนของโครงสร้างผลึก ซึ่งผลทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันและค่า enthalpy มีค่าต่ำกว่าในสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลที่สามารถนำมาอธิบายถึงคุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันที่เกิดขึ้นในแป้งลูกเดี๋ยทั้ง 2 พันธ์ได้ด้วย (Sasaki และคณะ, 2000)

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธ์ข้าวและคำจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC และอุณหภูมิที่เริ่มการเกิดเพสท์ด้วยเครื่อง RVA พบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดทั้ง 2 พันธ์ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง DSC มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เริ่มการเกิดเพสท์ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง RVA เนื่องจาก ผลของกำลังการพองตัวที่ช้า ส่งผลทำให้การวัดอุณหภูมิของการเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชันที่วัดได้จากเครื่อง RVA ได้ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการวัดอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันด้วยเครื่อง DSC ซึ่งสามารถสังเกตได้ในแป้งลูกเดี๋ยเต็มเม็ดพันธ์ดำ

### 3.4.6 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชลูกเด็ย

#### 3.4.6.1 รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก

ภาพที่ 3.11 แสดงลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำและขาว จากการวัดด้วย X-Ray diffraction (XRD) พบว่า ลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์จัดอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ A เนื่องจากพบพีคคู่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ 17 และ 17.9 (ภาพที่ 3.11) เช่นเดียวกับสตาร์ชข้าว (ภาพที่ 3.11a) โดยแป้งหรือสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคคู่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ 17 และ 17.9 แต่ไม่มีพีคตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ 5.6 ซึ่งจากการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคของสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์ให้พีคคู่ตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ 17 และ 17.9 แต่ไม่ให้พีคตำแหน่ง  $2\theta$  ที่ 5.6 จึงจัดสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีปริมาณผลึก (relative crystallinity) 24.56% และสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีปริมาณผลึก 22.86% (ตารางที่ 3.7) ซึ่งปริมาณผลึกที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวสาลีสตาร์ชข้าวบาร์เลย์ สตาร์ชทริคิล สตาร์ชข้าวเหนียวเจ้า และสตาร์ชข้าวเจ้า (33.5, 35.2, 35.0, 33.6 และ 28.94% ตามลำดับ) โดยความแตกต่างของปริมาณผลึกขึ้นกับชนิดของธัญพืช



ภาพที่ 3.11 ลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกของลูกเด็ยและข้าว (a= สตาร์ชข้าว b = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ และ c = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว)

ตารางที่ 3.7 ปริมาณผลึกของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ

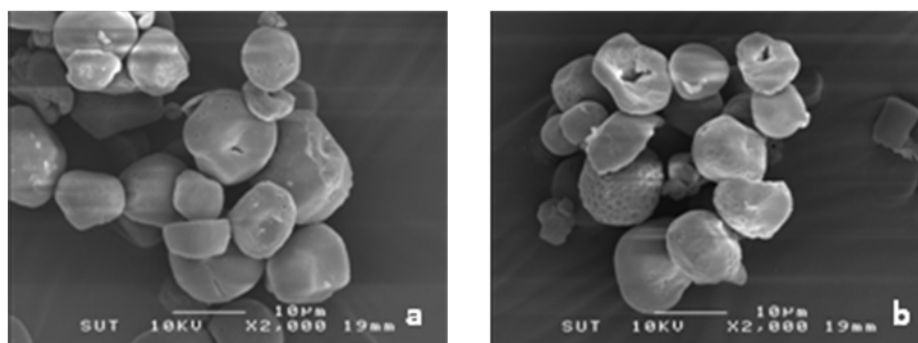
Sample	Relative crystallinity (%)
WS	24.56±1.14
BS	22.86±0.98

**หมายเหตุ** WS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ

ปริมาณอะไมโลส วิธีการวัดและการคำนวณปริมาณผลึก (Noosuk, Hill, Pradipasena และ Mitchell, 2003; Ao และ คณะ, 2007)

### 3.4.6.2 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

ลักษณะโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช (starch granule morphology) ของลูกเดือยทำการศึกษาด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงในภาพที่ 3.12 พบว่าลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีลักษณะเป็นเม็ดกลม หลายเหลี่ยม และมีรูพรุนบริเวณผิวด้านนอกที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 3.12) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยมีลักษณะคล้ายคลึงกับของเม็ดสตาร์ชข้าวโพด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และขนาดของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Diffraction particle size analyzer พบว่า รูปแบบของการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชลูกเดือย (particle size distribution) ทั้ง 2



ภาพที่ 3.12 ลักษณะ โครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b) ภายใต้กล้อง SEM

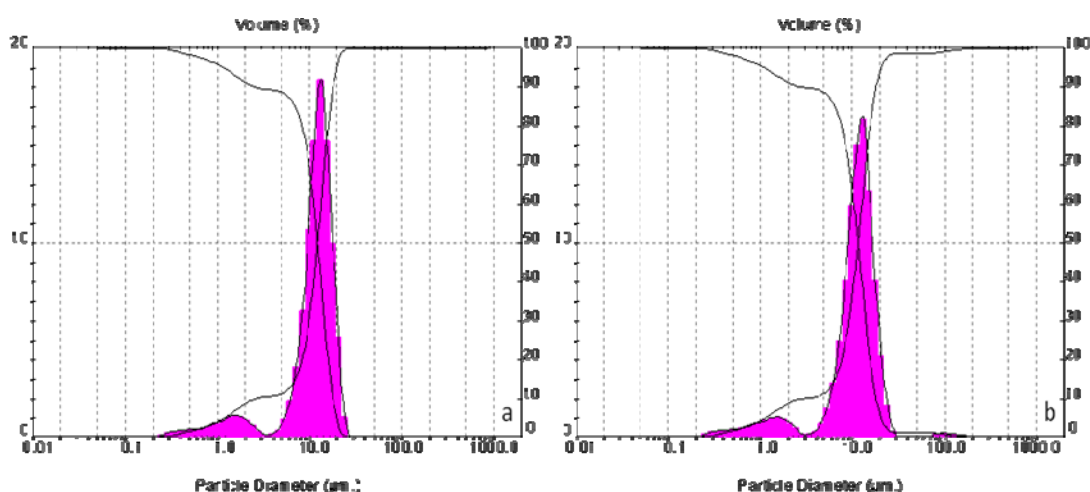
ตารางที่ 3.8 ขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ

Sample	WS	BS
Particle size (D4,3) ( $\mu\text{m}$ )	11.68 $\pm$ 0.07	12.29 $\pm$ 0.72

**หมายเหตุ** D 4,3 = ขนาดของอนุภาคที่มีการกระจายตัวเฉลี่ยสูงที่สุดของการกระจายตัวทั้งหมด

WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

พันธุ์มีลักษณะการกระจายเป็นกลุ่ม 2 ประชากร (bimodal distribution) (ภาพที่ 3.13) โดยเม็ดสตาร์ชลูกเดียวพันธุ์ขาวมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.25-3 ไมครอนและ 3-25 ไมครอน และมีค่าเฉลี่ยของขนาดของอนุภาคเม็ดสตาร์ช คือ 11.68 ไมครอน และเม็ดสตาร์ชลูกเดียวพันธุ์ดำมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2-3 ไมครอนและ 3-30 ไมครอนและมีค่าเฉลี่ยของขนาดของอนุภาคเม็ดสตาร์ช คือ 12.29 ไมครอน (ภาพที่ 3.13 และตารางที่ 3.8) ซึ่งขนาดของอนุภาคที่วัดได้เมื่อเทียบกับในงานวิจัยของ Maningat และ Seib (1992) ที่อ้างถึงในกล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) พบว่า ช่วงขนาดของอนุภาคที่วัดได้ของเม็ดสตาร์ชลูกเดียวยังมีขนาดช่วงที่กว้างกว่าในงานวิจัยของ Maningat และ Seib (1992) (8-20 ไมครอน)



ภาพที่ 3.13 การกระจายของขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดียวพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b)

### 3.4.6.3 ขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพกติน

ขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพกติน (chain-length distributions) ของสตาร์ชลูกเดียวทั้ง 2 พันธุ์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Anion Exchange Chromatography (HPAEC) แสดงในภาพที่ 3.14 และตารางที่ 3.9 พบว่า สตาร์ชลูกเดียวพันธุ์ขาวและดำมีการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพกตินมากที่สุดอยู่ในช่วง degree of polymerization (DP) ที่ 13-24 คือ 49.02 และ 48.65% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ สตาร์ชทริติคัล และสตาร์ช acorn (42.0, 41.8, 44.4 และ 42.1% ตามลำดับ) (Stevenson, Jane และ Inglett, 2006 และ Ao และ Jane, 2007) และสตาร์ชลูกเดียวพันธุ์ขาวและดำมีขนาดของสายโซ่อะไมโลเพกตินเฉลี่ย (average  $CL_n$ ) อยู่ที่ 21.01 และ 20.78 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวสาลี (23.3) สตาร์ช

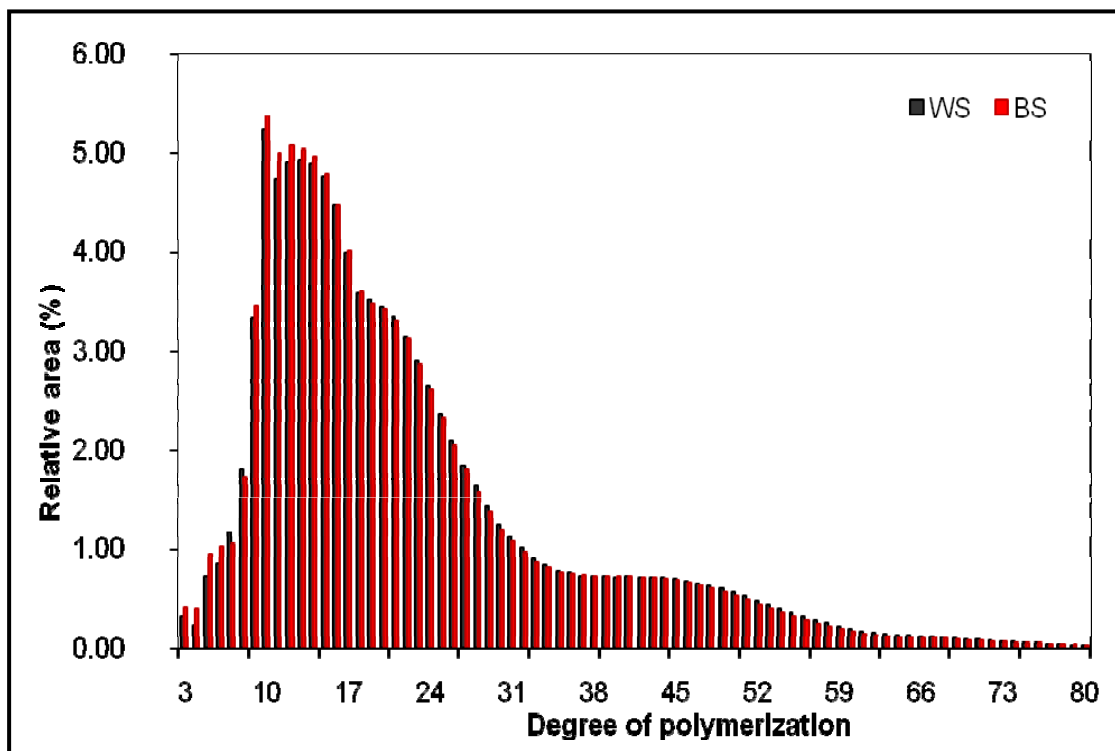
ข้าวบาร์เลย์ (25.7) สตาร์ชทริทิล (23.8) และสตาร์ช acorn (25.5) (Stevenso และคณะ, 2006 และ Ao และJane, 2007)

ตารางที่ 3.9 การกระจายของขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ

Sample	Peak DP		Average CL <sub>n</sub>	Percent distribution *					
	I	II		DP 3-5	DP 6-9	DP 6-12	DP 13-24	DP 25-36	DP ≥ 37
WS	11	42	21.01	1.83	9.37	24.53	49.02	11.70	12.92
BS	11	42	20.78	2.58	9.36	24.50	48.65	11.66	12.61

**หมายเหตุ** WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ DP = degree of polymerization และ CL = chain-length

\* การจัดแบ่งกลุ่ม DP จัดแบ่งตามนิยามของ Hanashiro, Abe และHizukuri (1996)

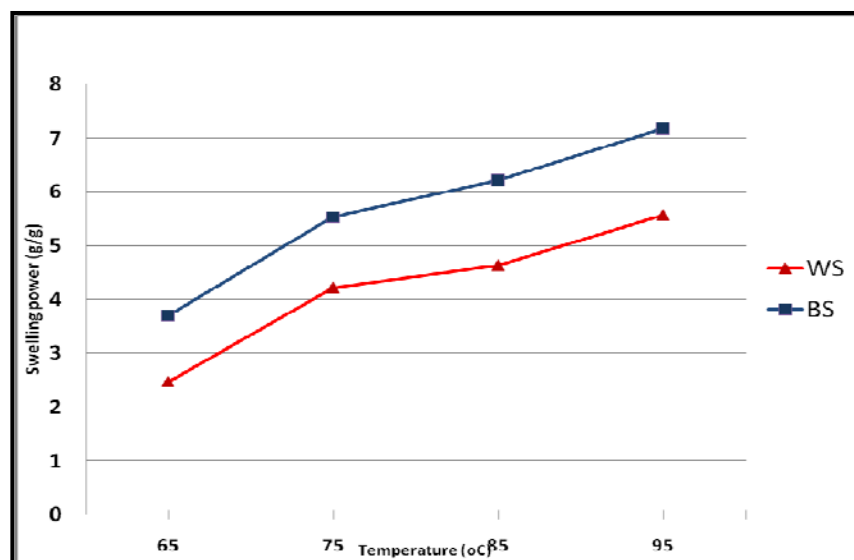


ภาพที่ 3.14 การกระจายของขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ

WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

#### 3.4.6.4 กำลังการพองตัวและการละลาย

กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำในช่วงอุณหภูมิ 65 - 95 องศาเซลเซียสแสดงในภาพที่ 3.15 พบว่า กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังการพองตัวเมื่ออุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากงานวิจัยของทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล (2530) ได้อธิบายไว้ว่า การพองตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โดยส่วนอสัณฐานเป็นบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชอย่างไม่เป็นระเบียบด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบอ่อน ๆ จึงถูกทำลายได้ง่ายและทำให้เกิดการพองตัวในช่วงแรก และส่วนผลึกเป็นบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชอย่างหนาแน่นด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงและจะถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการพองตัวในช่วงที่ 2 การที่กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าน้อยกว่าลูกเดือยพันธุ์ดำ เนื่องจากสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าลูกเดือยพันธุ์ดำ ซึ่งปริมาณของอะไมโลสหรืออัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินรวมถึงโครงสร้างของอะไมโลเพคตินด้วย มีผลต่อกำลังการพองตัว โดยสตาร์ชที่มีปริมาณของอะไมโลเพคตินสูงหรือมีปริมาณอะไมโลสต่ำมีผลให้สตาร์ชสามารถพองตัวได้สูง ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่มีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมากมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งไม่แข็งแรง เนื่องจากไม่สามารถจัดเรียงตัวกันอย่าง



ภาพที่ 3.15 กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ

WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ



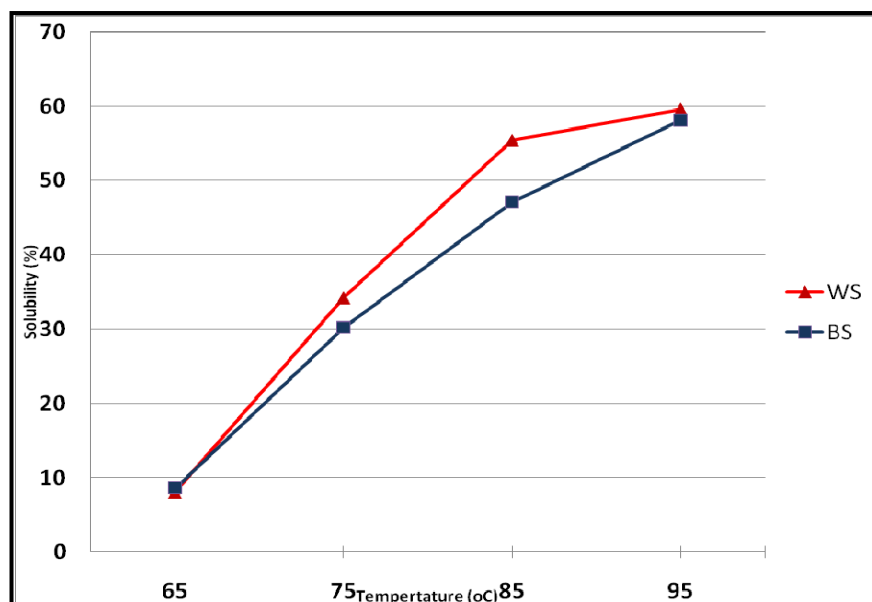
หนาแน่นได้ จากเหตุผลนี้เป็นเหตุให้สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจึงสามารถพองตัวได้ดีกว่า สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนเกี่ยวกับผลของอัตราส่วนของอะไมโลส ต่ออะไมโลเพคตินของ Tester และ Morrison (1990) ได้รายงานไว้ว่า สตาร์ชข้าวบาร์เลย์พันธุ์ข้าว เหนียว และสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าวบาร์เลย์พันธุ์ข้าวเจ้า และสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่า แต่ผลการทดลองของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำที่ได้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Tester และ Morrison (1990) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังการพองตัวอาจไม่ได้เป็นผลมาจากผลของปริมาณอะไมโลสเพียงอย่างเดียว แต่อาจมีผลเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณผลึก โดยสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวมีปริมาณผลึกสูงกว่าพันธุ์ดำทำให้ส่วนอัดแน่นของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ดำมีปริมาณที่สูงกว่า จึงทำให้น้ำสามารถที่จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้มากกว่าสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าว ซึ่งมีผลให้สตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ดำสามารถที่จะพองตัวได้สูงกว่าสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าว นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าว (4.63 กรัมต่อกรัม) และดำ (6.21 กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ normal amylose 5 พันธุ์ คือ Wuhan-1 coix, Guiyang wild coix, Neshi wild coix, Rongjiang wild coix, Neimang wild coix ซึ่งมีกำลังการพองตัวอยู่ในช่วง 10.3-12.7 กรัมต่อกรัม ทั้งนี้ความแตกต่างของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณอะไมโลส และพันธุ์ของลูกเดี๋ย โดยสตาร์ชลูกเดี๋ยทั้ง 5 พันธุ์จากงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) มีปริมาณอะไมโลสในช่วง 15.9-25.8% ในขณะที่สตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำมีปริมาณอะไมโลส 10.34 และ 17.01%

นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยกับ สตาร์ชอื่น ๆ เช่น งานวิจัยของ Simi และ Abraham (2008) พบว่า รูปแบบของกำลังการพองตัวของ สตาร์ชข้าวและสตาร์ชลูกเดี๋ยมีลักษณะเหมือนกัน คือ กำลังการพองตัวของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบรูปแบบของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยกับสตาร์ชมันฝรั่ง จากงานวิจัยของ Osundahunsi, Fagbemi, Kesselman และ Shimoni (2003) พบว่า รูปแบบของกำลัง การพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยและสตาร์ชมันฝรั่งมีลักษณะเหมือนกันเช่นกัน แต่กำลังการพองตัวที่ วัดได้ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของกำลังการพองตัวมีลักษณะที่กราฟ ชันและค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดี๋ย จึงมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างสตาร์ชลูกเดี๋ยและสตาร์ช มันฝรั่ง ซึ่งรูปแบบกำลังการพองตัวที่แตกต่างกันระหว่างสตาร์ชลูกเดี๋ย สตาร์ชข้าว และสตาร์ชมัน ฝรั่ง อาจเนื่องจากชนิดของแป้งที่แตกต่างกัน โดยแป้งที่ต่างชนิดกันมีผลต่อกำลังการพองตัวของ สตาร์ชที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชลูกเดี๋ยและสตาร์ชข้าวเป็นสตาร์ชจากธัญพืช ในขณะที่สตาร์ชมัน

ฝรั่งเป็นสตาโรนจากส่วนหัว ซึ่งสตาโรนจากธัญพืชจะมีการพองตัวที่ต่ำกว่าสตาโรนจากส่วนหัว เนื่องจากสตาโรนในกลุ่มนี้มีจำนวนพันธะภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งที่สูงมีผลให้ความแข็งแรงของเม็ดแป้งมีค่าสูงด้วย จึงเป็นผลให้สตาโรนในกลุ่มนี้มีการพองตัวที่ได้ต่ำ ในขณะที่สตาโรนจากส่วนหัวจะมีการพองตัวที่สูง เนื่องจากพันธะภายในร่างแหของโครงสร้างเม็ดแป้งอ่อนแอกว่าสตาโรนจากธัญพืชเป็นผลให้สตาโรนสามารถพองตัวได้สูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) นอกจากนี้เรื่องชนิดของแป้งที่มีผลต่อกำล้างการพองตัวแล้ว ยังมีผลเนื่องจากชนิดโครงสร้างผลึกของสตาโรนจากการวัดด้วยเครื่อง XRD ที่มีผลต่อการพองตัวของสตาโรนที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะการจัดเรียงของโครงสร้างของสตาโรนถูกเคี้ยวจัดอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ A ที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าโครงสร้างของสตาโรนมันฝรั่งซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B โดย Yuan, Zhang, Dai และ Yu (2007) ได้รายงานว่ สตาโรนจากมันสำปะหลังที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A มีกำล้างการพองตัวที่ต่ำกว่าสตาโรนมันฝรั่งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B แต่มีค่าสูงกว่าสตาโรนจาก *Dioscorea nipponica Makino* ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C

ค่าการละลายของสตาโรนที่ถูกเคี้ยวพันธุ์ขาวและดำที่ช่วงอุณหภูมิ 65-95 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 3.16 พบว่า ค่าการละลายของสตาโรนทั้ง 2 พันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการละลายของสตาโรนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะถูกทำลาย ทำให้เม็ดสตาโรนเกิดการพองตัวและโมเลกุลของน้ำสามารถเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระได้ จึงทำให้บางส่วนของสตาโรนละลายออกมามีผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายออกมามีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ค่าการละลายมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของสตาโรนที่ถูกเคี้ยวระหว่าง 2 พันธุ์ พบว่า ค่าการละลายของสตาโรนที่ถูกเคี้ยวพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งผลที่ได้ให้ผลในทางตรงกันข้ามกับผลของค่ากำล้างการพองตัวของสตาโรนที่ถูกเคี้ยวที่พันธุ์ขาวให้ค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำ ความแตกต่างของค่าการละลายของสตาโรนที่ถูกเคี้ยวระหว่าง 2 พันธุ์ อาจเนื่องจากสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนอสัณฐานและส่วนผลึกรวมไปถึงปริมาณอะไมโลส (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546 และ Hoover, 2001) โดยคุณสมบัติทางด้านการละลายแสดงให้เห็นถึงพันธะภายในเม็ดสตาโรน โดยพันธะที่เกิดขึ้นในธัญพืชสามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 บริเวณ คือ พันธะบริเวณผลึกและพันธะบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้ง (Onitilo, Sanni, Daniel, Dixon และ Dixon, 2007; กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ซึ่งพันธะภายในเม็ดสตาโรนที่เกิดขึ้น ได้แก่ พันธะที่เกิดจากการจับกันระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลส อะไมโลสกับอะไมโลเพคติน อะไมโลสกับไขมัน เป็นต้น ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดแป้ง โดยมีผลต่อการหลุดออกจากโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินสายสั้นบางส่วนจากเม็ดแป้ง เนื่องจากการวัดค่าการละลายของสตาโรนเป็นการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายออกมาได้ (Tester และ

Morrison, 1990) ซึ่งทางหนึ่งที่เป็นไปได้ คือ อะไมโลส และ โครงสร้างของอะไมโลเพคตินสายสั้น ดังนั้น สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสมากกว่าจะมีโอกาสหลุดออกจากโครงสร้างเม็ดแป้งที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามสตาร์ชที่มีส่วนอสัณฐานมากกว่า ก็มีโอกาสหลุดออกจากโครงสร้างเม็ดแป้งของ อะไมโลเพคตินสายสั้นก็เป็นไปได้มากกว่า แต่ผลของค่าการละลายในสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำที่ได้นั้นพบว่า สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวที่มีปริมาณอะไมโลสและส่วนของอสัณฐานน้อยกว่ามีค่าการละลายสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ อาจเป็นผลมาจากปริมาณของเถ้าหรือแร่ธาตุต่าง ๆ ที่แตกต่างกันโดยสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณเถ้าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ ซึ่งเถ้าหรือคือแร่ธาตุนั้นสามารถที่จะละลายในน้ำได้ ดังนั้น การที่สตาร์ชลูกเดือยมีปริมาณเถ้าสูงกว่าก็มีโอกาสการละลายของแร่ธาตุในน้ำสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ เป็นผลให้สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าการละลายสูงกว่าพันธุ์ดำ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (55.43%) และดำ (47.10%) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ normal amylose 5 พันธุ์ ซึ่งมีค่าการละลายในช่วง 4.4-8.8% ทั้งนี้ความแตกต่างของค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) อาจเป็นผลเนื่องจากพันธุ์ของลูกเดือยที่ต่างกันและการปลูกที่สภาพอากาศหรือภูมิประเทศที่ต่างกัน ให้กำลังการพองตัวกับการละลายที่ต่างก็ก็เป็นไปได้



ภาพที่ 3.16 ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ

WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

### 3.4.6.5 คุณสมบัติการเกิดเพสท์

คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แสดงผลในตารางที่ 3.10 พบว่า ค่าความหนืดสูงสุด ค่าเบรคดาวน์และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดสุดท้ายและค่าเซตแบคของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ทั้งนี้ความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ เนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณอะไมโลส คือ สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าพันธุ์ขาว แสดงให้เห็นว่า สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีส่วนของอะไมโลเพคตินที่น้อยกว่าพันธุ์ขาว ซึ่งทำให้สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำเกิดการพองตัวได้น้อยกว่าพันธุ์ขาว เนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่มีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมากมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งไม่แข็งแรง ซึ่งมาจากการที่ไม่สามารถจะจัดเรียงตัวได้อย่างหนาแน่น ดังนั้น จากการที่สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีการพองตัวที่ช้ากว่า ส่งผลให้สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีความหนืดสูงสุดต่ำกว่าพันธุ์ขาว แต่การที่ค่าเซตแบคและค่าความหนืดสุดท้ายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว เนื่องจากสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่า ส่งผลให้โอกาสการจัดเรียงตัวกันของอะไมโลสอีกครั้งมีโอกาสดังกล่าวสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว จึงเป็นเหตุให้ความหนืดที่เกิดขึ้นหลังจากลดอุณหภูมิจาก 95 เป็น 50 องศาเซลเซียสของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว ซึ่งจากงานวิจัยของ Varavinit และคณะ (2003) ได้อธิบายสนับสนุนเกี่ยวกับผลของปริมาณอะไมโลสต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ พบว่า สตาร์ชขาวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจะให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่สูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลส

ตารางที่ 3.10 คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ

Sample	Pasting parameter (RVU)					Pasting Temperature (°C)
	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	
WS	101.61±0.49 <sup>a</sup>	-4.28±0.29 <sup>b</sup>	105.89±0.59 <sup>a</sup>	-1.17±0.14 <sup>b</sup>	3.11±0.19 <sup>b</sup>	73.30±0.26 <sup>a</sup>
BS	70.92±0.42 <sup>b</sup>	-0.86±0.42 <sup>a</sup>	71.78±0.05 <sup>b</sup>	7.06±0.77 <sup>a</sup>	7.92±0.55 <sup>a</sup>	71.33±0.24 <sup>b</sup>

**หมายเหตุ** WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สูงกว่า นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของสตาร์ชลูกเดือยกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่วิเคราะห์ได้ของสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Li และ Corke (1999) โดยคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของสตาร์ช normal amylose 5 พันธุ์นี้มีค่าความหนืดสูงสุด 167-203 RVU ค่าความหนืดสุดท้าย 185-208 RVU ค่าเบรคดาวน์ 47-63 RVU และค่าเซตแบค 55-87 RVU ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่แตกต่างกันของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) เนื่องมาจากความแตกต่างในเรื่องของพันธุ์ที่นำมาวิเคราะห์ที่แตกต่างกันจากงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) นอกจากนี้ เมื่อเทียบคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยกับสตาร์ชอื่นในกลุ่มโครงสร้างผลึกแบบ A เช่น สตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ และสตาร์ชทริติคัล พบว่า คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์มีค่าต่ำกว่าสตาร์ชทั้ง 3 ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยกับสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดเกิดได้จากหลากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณอะไมโลส และโครงสร้างของอะไมโลเพคติน โดยโครงสร้างของอะไมโลเพคตินมีผลต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินที่ใหญ่และแตกแขนงออกเป็นกิ่งก้านจำนวนมาก มีผลต่อการจับกันระหว่างโมเลกุลของสายอะไมโลเพคตินกันเองซึ่งทำให้ความแข็งแรงของเม็ดแป้งมีปริมาณมากขึ้น (Ao และ Jane, 2007) นอกจากนี้ อิทธิพลร่วมระหว่างความยาวของกิ่งก้านของอะไมโลเพคตินและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสก็ส่งผลต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชด้วย (Jane และ Chen, 1992)

#### 3.4.6.5 คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเดือยที่วัดได้จากเครื่อง DSC ได้แก่  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  ซึ่งคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์แสดงในตารางที่ 3.11 พบว่า ค่า  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  ของสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่ค่า  $T_0$  ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 68.28, 73.98, 80.94, 12.66 องศาเซลเซียส และ 15.00 (J/g) ตามลำดับ และสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 66.82, 70.98, 76.74, 9.92 องศาเซลเซียส และ 14.22 (J/g) ตามลำดับ (ตารางที่ 3.11) ความแตกต่างของค่า  $T_0$  ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณผลึก โดยสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งจากงานวิจัยของ Singh และคณะ (2003) ที่รายงานไว้ว่า สตาร์ชที่มีปริมาณผลึกสูงจะให้โครงสร้างที่แข็งแรงและเสถียรสูง ซึ่งมีผลให้เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการต้านความร้อนได้สูง จึงให้คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

สูง ดังนั้น การที่สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีปริมาณผลึกที่สูงกว่าส่งผลให้การให้ความร้อนเพื่อทำลายพันธะในส่วนผลึกของสตาร์ชลูกเด็ยจึงต้องใช้ปริมาณที่สูงกว่าสตาร์ชพันธุ์ดำ มีผลให้ค่า  $T_0$  ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ นอกจากนี้ เมื่อเทียบคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า จากงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า ลูกเด็ยพันธุ์ normal amylose 5 พันธุ์มีค่า  $T_0$  เท่ากับ 63.9-69.4 องศาเซลเซียส  $T_p$  เท่ากับ 71.9-75.5 องศาเซลเซียส  $T_c$  เท่ากับ 78.5-82.2 องศาเซลเซียส  $T_c - T_0$  เท่ากับ 12.8-16.0 องศาเซลเซียส และ  $\Delta H$  เท่ากับ 8.0-9.9 (J/g) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยกับสตาร์ชอื่น ๆ พบว่า คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวสาลีที่มีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 61.7, 65.3, 69.3, 7.6 องศาเซลเซียส และ 12.4 (J/g) สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ที่มีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 57.9, 62.6, 67.9, 10.0 องศาเซลเซียส และ 12.6 (J/g) และสตาร์ชทริติคัลที่มีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 60.7, 64.2, 68.4, 7.7 องศาเซลเซียส และ  $\Delta H$  เท่ากับ 12.6 (J/g) (Ao และ Jane, 2007) ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยกับสตาร์ชจากธัญพืชทั้ง 3 ชนิด เนื่องมาจากความแตกต่างในเรื่องของชนิดสตาร์ช รวมถึงปริมาณอะไมโลสและโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.11 คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ

Sample	Thermal transition parameters				
	$T_0$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_c - T_0$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
WS	68.28 ± 0.13	73.98 ± 0.77 <sup>a</sup>	80.94 ± 1.70 <sup>a</sup>	12.66 ± 1.60 <sup>a</sup>	15.00 ± 0.24
BS	66.82 ± 0.22	70.98 ± 0.09 <sup>b</sup>	76.74 ± 0.29 <sup>b</sup>	9.92 ± 0.09 <sup>b</sup>	14.22 ± 0.65

**หมายเหตุ**  $T_0$  = gelatinization onset temperature  $T_p$  = gelatinization peak temperature  $T_c$  = gelatinization completion temperature  $T_c - T_0$  = gelatinization temperature range และ  $\Delta H$  = Enthalpy WS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### 3.4.6.6 คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation properties) เป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินหลังผ่านการให้ความร้อน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิและช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันได้หลากหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Pulses Nuclear Magnetic Resonance และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งในที่นี้ทำการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC โดยคุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์เกิดได้ช้าและใช้ระยะเวลาในการจัดเรียงโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินใหม่นานถึง 39 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดือยใช้ระยะเวลานานกว่าสตาร์ชอื่น ๆ ในกลุ่มโครงสร้างผลึกแบบ A ด้วยกัน อาทิเช่น สตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ สตาร์ชทริติคัลและสตาร์ชข้าวเหนียวที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันเพียง 7 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (Ao และ Jane, 2007; Sasaki, Kohyama, Suzuki, Okamoto, Noel และ Ring, 2009) แต่ในอีกงานวิจัยหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียว โดยเก็บตัวอย่างหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเช่นกัน พบว่า ต้องใช้ระยะเวลาอันนานถึง 28 วันในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Lin และ Lii, 2001) และอีกงานวิจัยหนึ่ง ได้รายงานว่าการเก็บตัวอย่างสตาร์ชที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของสตาร์ชข้าวสาลีพันธุ์ข้าวเจ้า (normal) และข้าวเหนียว (waxy) ต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชัน

**ตารางที่ 3.12** คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ข้าวและดำ หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 39 วัน

Sample	Thermal transition parameters				
	$T_o$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_c - T_o$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
WS	39.02 ± 0.60	47.02 ± 1.22	59.48 ± 1.70 <sup>a</sup>	20.79 ± 1.42 <sup>a</sup>	8.20 ± 1.57
BS	40.20 ± 0.20	45.75 ± 0.11	52.96 ± 2.41 <sup>b</sup>	12.76 ± 4.09 <sup>b</sup>	10.17 ± 3.33

**หมายเหตุ**  $T_o$  = gelatinization onset temperature  $T_p$  = gelatinization peak temperature  $T_c$  = gelatinization completion temperature  $T_c - T_o$  = gelatinization temperature range และ  $\Delta H$  = Enthalpy WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ข้าว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ของสตาร์ชนานถึง 28 วันเช่นกัน (Sasaki และคณะ, 2000) ซึ่งคุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิในการเก็บปริมาณและขนาดของอะไมโลส โครงสร้างของอะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในสตาร์ช โดยปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญมากต่อการคืนตัวของแป้ง โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดียวที่ใช้ระยะเวลาเวลานาน อาจเนื่องมาจากปริมาณและขนาดของอะไมโลส หรืออาจเนื่องมาจากปัจจัยในเรื่องของขนาดและการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.9 และภาพที่ 3.14 โดยการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดียวพันธุ์ขาวและดำที่ได้ พบว่า ขนาดและการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดียวยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับสตาร์ชอื่น ๆ ในกลุ่มโครงสร้างผลึกแบบ A เช่น สตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ และสตาร์ชทริติคัล (Ao และ Jane, 2007) ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดียวที่ชานี้ อาจเป็นผลมาจากค่าเซตแบคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ในตารางที่ 3.10 โดยค่าเซตแบคของสตาร์ชลูกเดียวยังพันธุ์ขาวและดำมีค่า 3.11 และ 7.92 ตามลำดับ ซึ่งค่าเซตแบคของสตาร์ชลูกเดียวทั้ง 2 พันธุ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าเซตแบคของสตาร์ชข้าวสาลี (96.0 RVU) สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ (75.3 RVU) และสตาร์ชทริติคัล (95.4 RVU) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สตาร์ชลูกเดียวเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดียวได้ช้ากว่าสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดนี้ นอกจากนี้ ค่าอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันสตาร์ชลูกเดียวยังพันธุ์ขาวมีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 39.02, 47.02, 59.84, 20.79 องศาเซลเซียส และ 8.20 (J/g) ตามลำดับ และสตาร์ชลูกเดียวยังพันธุ์ดำมีค่า  $T_0$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ,  $T_c - T_0$  และ  $\Delta H$  เท่ากับ 40.20, 45.75, 52.96, 12.76 องศาเซลเซียส และ 10.17 (J/g) ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 3.12

### 3.5 บทสรุป

ลูกเดียวยังมีลักษณะรูปร่างภายในและภายนอกใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ ซึ่งตำแหน่งของคัพภะของลูกเดียวยังอยู่ติดกับส่วนของ black layer โดยมีส่วนของเอนโดสเปิร์มโอบล้อมส่วนคัพภะและปริมาณของส่วนคัพภะของลูกเดียวยังมีปริมาณอยู่ประมาณ 1 ใน 3 ของทั้งเมล็ด องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดียวยังเต็มเมล็ดและแป้งลูกเดียวที่แยกคัพภะออกพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าในพันธุ์ขาว antioxidant properties คือ DPPH radical scavenging activity reducing power และปริมาณ coixenolide ในลูกเดียวยังพันธุ์ขาวและดำมีค่าไม่แตกต่างกันแต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในลูกเดียวยังพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ กำลังการพองตัวและคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของแป้งลูกเดียวยังพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ในขณะที่ค่าการละลายและอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ของลูกเดียวยังพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำทั้งในแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกคัพภะออก



สตาร์ชลูกเด็ยมีลักษณะกลม หลายเหลี่ยม โดยมีขนาดของอนุภาคสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว และดำ เท่ากับ 11.68 และ 12.29 ไมครอนตามลำดับ โครงสร้างผลึกของสตาร์ชลูกเด็ยแสดง ลักษณะแบบ A สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำมีการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินมากที่สุด อยู่ในช่วง DP ที่ 13-24 คือ 49.02 และ 48.65% ตามลำดับ และมีขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินเฉลี่ย (average  $CL_n$ ) อยู่ที่ DP 21.01 และ 20.78 ตามลำดับ ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาที่ในเซชันของสตาร์ช ลูกเด็ย 2 พันธุ์อยู่ในช่วง 63-81 องศาเซลเซียส การเกิดรีโทรเกรเดชันของลูกเด็ยใช้ระยะเวลาาน 39 วันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และค่าการละลาย คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทั้งทางด้านความหนืด และอุณหภูมิของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ในขณะที่กำลังการพองตัวของสตาร์ช ลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำ

### 3.6 รายการอ้างอิง

- ทัศนีย์ พรกิจประสาน. (2530). ลูกเด็ย: คุณสมบัติบางประการและผลิตภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2530). การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ของแป้งและสตาร์ชลูกเด็ย. *วารสารเกษตรศาสตร์(วิทย์.)* 21: 371-377.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2531). ผลิตภัณฑ์ลูกเด็ย. *วารสารเกษตรศาสตร์(วิทย์.)* 22: 103 – 109.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, รุ่งทิภา วันสุขศรี และบุญทิภา นิลจันทร์. (2546). การศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ใน ประเทศไทยเพื่อเป็นกลยุทธ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม. สำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติ.
- วันชัย จันทร์ประเสริฐ. (2537). *สรีระวิทยาเมล็ดพันธุ์*. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล (2532). *เคมีทางัญญาอาหาร*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะ อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล (2540). *ข้าวสาลี: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่2. มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- อรอนงค์ นัยวิกุล (2547). *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- AACC (2000). *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists* (10<sup>th</sup> ed.). Volume 2. Washington DC, U.S.A.: American Association of Cereal Chemists, Inc.

- Andersson, A. A. M., Andersson, R., Autio, K. and Man P. A. (1999). Chemical composition and microstructure of two naked waxy barleys. **J. Cereal Sci.** 30: 183-191.
- AOAC (2000). **Official Methods of Analysis** (17<sup>th</sup> ed.). Washington DC. U.S.A.: Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Ao, Z. and Jane, J. L. (2007). Characterization and modeling of the A- and B-granule starches of wheat, triticale and barley. **Carbohydr. Polym.** 67: 46-55.
- Autio, K. and Marttila, M. S. (2001). Light microscopic investigations of cereal grain, doughs and breads. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 34: 18-22.
- Available: <http://www.purcellmountainfarms.com>
- Available: [http:// en.jlshengda.com](http://en.jlshengda.com)
- Available: [http:// www.answer.com](http://www.answer.com)
- Beeson, W. M., Lehrer, W. P., and Woods, E. (1947). Peas, supplemented with wheat germ or corn germ, as a source of protein for growth. **J. Nutr.** 1: 587-593.
- Boros, L. G., Nichelatti, M. and Shoenfeld, Y. (2005). Fermented wheat germ extract (Avenmar) in the treatment of cancer and autoimmune diseases. **Ann. N.Y. Acad. Sci.** 1051: 529-542.
- Butsat, S. and Siriamornpun, S. (2010). Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice. **Food Chem.** 119(2): 606-613.
- Chang, H. C., Huang, Y. C. and Hung, W. C. (2003). Antiproliferative and chemopreventive effect of adlay seed on lung cancer in vitro and in vivo. **J. Agr. Food Chem.** 51: 3656-3660.
- Chang, H. M. and But, P. P. H. (1987). Pharmacology and applications of Chinese materia medica, volume2. World Scientific. Singapore.
- Chang, S .M. and Chang, T. L. (1998). Effect of various thermal treatments on the physicochemical properties of adlay. **Bull. Inst.** 45: 55-65.
- Chiang, W., Cheng, C.-Y., Chaiang, M.-T. and Chung, K.-T. (2000). Effect of dehulled adlay on the culture count of some micobiota and their metabolism in the gastrointestinal tract of rats. **J. Agr. Food Chem.** 48: 829-832.
- Chun, K. S., Chiang, W. and Kuo, M. L. (2004). Effect of adlay on azoxymethane-induced colon carcinogenesis in rats. **Food Chem. Toxicol.** 42: 1339 – 1347.
- Choi, Y., Jeong, H-S. and Lee, J. (2007). Antioxidant activity of methanolic extracts from some grains consumed in Korea. **Food Chem.** 103(1): 130-138.

- Dharamanada, S. (2007). Effective use of mild acting herbs VI Coix-Yi Yi Ren. **Chinese Med. Times.** 2(4): 1-3.
- Englyst, K. N., Englyst, H. N., Hudson, J. G., Cole, T. J. and Cummings, J. H. (1999). Rapidly available glucose in foods: an in vitro measurement that reflects the glyceemic response. **Am. J. Clin. Nutr.** 69: 448-454.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M. and Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **Euro. J. Clin. Nutr.** 46: 33-50.
- Evers, T. and Millart, S. (2002). Cereal grain structure and development: some implications for quality. **J. Cereal Sci.** 36: 261-284.
- Govindasamy, S., Oates, C. G., and Wong, H. W. (1993). Characterisation of changes of sago starch components during hydrolysis by thermostable alpha-amylase. **Carbohydr. Polym.** 18: 89-100
- Ge, Y., Sun, A., Ni, Y. and Cai, T. (2001). Study and development of a defatted wheat germ nutritive noodle. **Eur. Food Res. Technol.** 212: 344-348.
- Grausgruber, H., Scheibkauer, J., Schönlechner, R., Ruckenbauer, P. and Berghofer, E. (2004). Variability in chemical composition and biologically active constituents of cereals. **Genetic Variation for Plant Bleeding:** 23-26.
- Hamaker, B. R. and Griffin, V. K. (1990). Changing the viscoelastic properties of cooked rice through protein disruption. **Cereal Chem.** 67(3): 261-264.
- Hamaker, B. R. and Griffin, V. K. (1993). Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. **Cereal Chem.** 70: 377-380.
- Hasjim, J., Srichuwong, S., Scott, M. P. and Jane, J-L. (2009). Kernel composition, starch structure, and enzyme digestibility of *opaque-2* Maize and quality protein maize. **J. Agr. Food Chem.** 57(5): 2049-2055.
- Hermans, P. H and Weidinger, A. (1961). On the determination of the crystalline fraction of polyethylenes from X-ray diffraction. **Macromol. Chem.** 24: 24-36.
- Hoseney, R. C. (1994). **Principles of cereal science and technology.** (2<sup>nd</sup> ed). American Association of Cereal Chemist, Inc. U.S.A.
- Houssou, P. and Ayernor, G. S. (2002). Appropriate processing and food functional properties of maize flour. **AJST. Sci. Engi.** 3(1): 126-131.

- Hsia, S.-M., Yeh, C.-L., Kuo, Y.-H., Wang, P. S. and Chiang, W. (2007). Effects of adlay (Coix lachryma-jobi L. Var. ma-yuen Stapf.) hull extracts on the secretion of progesterone and estradiol in vivo and in vitro. **Soci. Exper. Bio. Med.** 1181-1194.
- Hu, A.-J., Zhao, S., Liang, H., Qiu, T.-Q. and Chen, G.(2006). Ultrasound assisted supercritical fluid extraction of oil and coixenolide from adlay seed. **Ultrasound Sonochem.** 14: 219-224.
- Hung, P. V., Maeda, T. Miyatake, K. and Morita, N. (2009). Total phenolic compounds and antioxidant capacity of wheat graded flours by polishing method. **Food Res. Int.** 42: 185-190.
- Hung, W. C. and Chang, H. C. (2003). Methanolic extract of adlay seed suppresses COX-2 expression of human lung cancer cells via inhibition of gene transcription. **J. Agr. Food Chem.**51: 7333-7337.
- Jane, J. and Chen, J. F. (1992). Effect of amylose molecular size and amylopectin branch length on paste properties of starch. **Cereal Chem.** 69: 60-65.
- Jensen, M. K., Banerjee, P. K., Hu, F. B., Franz, M. Sampson, L. and Gronbaek, M. (2004). Intakes of whole grains, bran, and germ and the risk of coronary heart disease in men. **Am. J. Clin. Nutr.** 80: 1492-1499.
- Jensen, M. K., Banerjee, P. K., Hu, F. B., Franz, M. Sampson, L., Gronbaek, M. and Rimun, E. B. (2006). Whole grains, bran, and germ in relation to homocysteine and markers of glycemic control, lipids and inflammation. **Am. J. Clin. Nutr.** 83: 275-283.
- Jiang, H. E, Wang, B., Li, X., Lü, E.G. and Li, C. S. (2008). A consideration of the involucres remains of Coix lachryma-jobi L. (Poaceae) in the Sampula Cemetery (2000 years BP), Xinjiang, China. **J. Archaeol. Sci.** 35:1311-1316.
- Juliano, B. O. (1979). The chemical basis of grain quality, p69. In Proceeding of the workshop on Chemical Aspects of Rice Grain Quality, The Intern Rice Res. Ins. Los Banos, Laguna, Phillippines.
- Khurana, R., Uversky, V. N., Nielsen, L. and Fink, A. L.( 2001). Is congo red an amyloid-specific dye?. **J. Bio. Chem.** 276(25): 22715-22721.
- Krishnan. S. and Dayanandan, P. (2003). Structural and histochemical studies on grain-filling in the caryopsis of rice (Oryza sativa L.). **J. Bioscience.** 28(4): 455-469.

- Kuo, C. C., Chang, W., Liu, G. P., Chen, Y. L., Chang, J. Y., Lee, C. K., Lo, J. M., Huang, S. L., Shih, M. C. and Kuo, Y. H. (2002). 2,2'-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical-scavenging active components from adlay (Coix lachryma-jobi L. Var. ma-yuen Stapf.) hulls. **J. Agr. Food Chem.** 50: 5850-5855.
- Lee, M.-Y., Lin, H.-Y., Cheng, F., Chiang, W. and Kuo, Y.-H. (2008). Isolation and characterization of new lactam compounds that inhibit lung and colon cancer cells from adlay (Coix lachryma-jobi L. Var. ma-yuen Stapf.) bran. **Food Chem. Toxicol.** 46: 1933-1939.
- Lee, S. C., Jeong, S. M., Kim, S. Y., Park, H. R., Nam, K. C. and Ahn, D. U. (2006). Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. **Food Chem.** 94: 489-493.
- Lehmann, U. and Robin, F. (2007). Slowly digestible starch-its structure and health implications: review. **Trends Food Sci. Technol.** 18: 346-355.
- Li, Dapeng. (2005). Progress in pharmacodynamics and clinical studies of active components of Coix seed (semen coicis) and its preparation- Kanglaite injection (KLT): **Zhejiang Kanglaite Pharmaceutical Co., LTD.** 1-10.
- Li, D.-P. (2006). Research advance on ethenopharmacolgy, pharmacodynamics, pharmacokinetics and clinical therapeutics of Coix seed and its preparation, Kanglaite injection. **Asian. J. Pharmacodynamics Pharmacokinet.** 6(2): 83-102.
- Li, J. and Corke, H. (1999). Physicochemical properties of normal and waxy Job's Tears (Coix lachryma-jobi L.) starch. **Cereal Chem.** 76(3): 413-416.
- Lin, Y., and Lii, C. (2001). Correlation between starch retrogradation and water mobility was determined by differential scanning calorimeter (DSC) and nuclear magnetic resonance (NMR). **Cereal Chem.** 78: 647-653.
- Liu, Q., Donner, E., Yin, Y., Huang, R. L. and Fan, M. Z. (2006). The physicochemical properties and in vitro digestibility of selected cereals, tubers and legumes grown in China. **Food Chem.** 99: 470-477.
- Liu, Q. and Yao, H. (2007). Antioxidant activities of barley seeds extracts. **Food Chem.** 102: 732-737.

- Lugli, J., Campbell, A., Gaziola, S. A., Smith, R. J. Lea, P. J. and Azevedo, R. A. (2002). Enzymes of lysine metabolism from Coix lachryma-jobi L. seeds. **Plant Physiol. Bioch.** 40: 25-32.
- Ma, K.-H., Kim, K.-H., Dixit, A., Yu, J. W., Chung, J.-W., Lee, J.-H., Cho, E.-G., Kim, T. S. and Park, Y.-J. (2006). Newly developed polymorphic microsatellite markers in Job's tears (Coix lachryma-jobi L.). **Mol. Eco. Notes.** 6: 689 -691.
- Maisuthisakula, P., Pasukb, S. and Ritthiruangdej, P. (2008). Relationship between antioxidant properties and chemical composition of some Thai plants. **J. Food Compos. Anal.** 21: 229-240.
- Maningat, C.C. and Seib, P.A. (1992). Starch: Occurrence, isolation and properties of starch granules. In AACC Short Course "Starch: Structure, Properties, and Food uses". December 3-4, 1992. Chicago.
- Marinova, D., Ribarova, F. and Atanassova, M. (2005). Total phenolics and total flavonoids in bulgarian fruits and vegetables. **J. Univer. Chem. Tech. Metallurgy.** 40(3): 255-260.
- Mohamed, A., Jamilah, B., Abbas, K. A., Rahman, R. A. and Roselina, K. (2008). A review on physicochemical and thermorheological properties of sago starch. **Am. J. Agr. Bio. Sci.** 3(4): 639-646.
- Morismta, T., Harai, T. Sudai, I. and Tetsukai, T. (2002). Radical-scavenging activity in common buckwheat (Fagopyrum esculentum Moench) harvested in the Kyushu region of Japan. **Fagopyrum** 19: 89-93.
- Munter, J. S. L., Hu, F. B., Spiegelman, D., Franz, M. and Dam, R. M. (2007) Whole grain, bran, and germ intake and risk of type 2 diabetes: a prospective cohort study and systematic review. **Plos. Med.** 4(8): 1385-1395.
- Noosuk, P., Hill, S. E., Pradipasena, P. and Mitchell, J. R. (2003). Structure-viscosity relationships for Thai rice starches. **Starch/Stärke** 55: 337-344.
- Numuta, M., Yamamoto, A., Moribayashi, A. and Yamada, H. (1994). Antitumor components isolated from the Chinese herbal medicine Coix lachryma-jobi L. **Planta Med.** 60(4): 356-359.
- Onitilo, M. O., Sanni, L. O., Daniel, I., Maziya-Dixon, B. and Dixon, A. (2007). Physicochemical and functional properties of native starches from cassava varieties in Southwest Nigeria. **J. Food Agr. Environ.** 5(3&4): 108-114.

- Ottoboni, L. M. M., Leite, A., Targon, M. L. N., Crozier, A. and Arruda, P. (1990). Characterization of the storage protein in seed of Coix lachryma-jobi L var. Adlay. **J. Agr. Food Chem.** 38: 631-635.
- Oyaizu, M. (1986). Studied of products of browning reaction: antioxidant activities of products of browning reaction prepared from glucosamine. **Jpn. J. Nutr.** 44: 307-315.
- Pomeranz, Y., National Barley and Malt Laboratory and Sachs, I.B. (1972). Scanning electron microscopy of the buckwheat kernel. **Am. Assoc. Cereal Chem.** 23-25.
- Pomeranz, Y. (1988). Chemical composition of kernel structure. In: Pomeranz, Y. (ed), Wheat: chemistry and technology (vol I). (3<sup>rd</sup> ed). St Paul. MN: **Am Assoc Cereal Chem**: 97-158.
- Pomeranz, Y. 1991. Functional properties of food components. (2<sup>nd</sup> ed). pp.27-28, Academic Press. New York.
- Prakash, A. (2001). Analytical progress antioxidant activity. **Medallion Laboratories.** 19:1-6.
- Punchongkavarin, H., Varavinit, S. and Bergthaller, W. (2005). Comparative study of pilot scale rice starch production by an alkaline and an enzymatic process. **Starch/Stärke.** 57: 134-144.
- Ragae, S., Abdel-Aal, E-S. M. and Noaman, M. (2006). Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. **Food Chem.** 98: 32-38.
- Sasaki, T., Yasui, T., and Matsuki, J. (2000). Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of starches from waxy and non-waxy wheat and their F1 seeds. **Cereal Chem.** 77: 58-63.
- Sasaki, T. (2005). Effect of wheat starch characteristics on the gelatinization, retrogradation, and gelation properties. **JARQ** 39 (4): 253-260.
- Sasaki, T., Kohyama, K., Suzuki, Y., Okamoto, K., Noel, T. R. and Ring, S. G. (2009). Physicochemical characteristics of waxy rice starch influencing the in vitro digestibility of a starch gel. **Food Chem.** 116: 137-142.
- Silva, L. P. and Ciocca, M. L. S. (2005). Total, insoluble and soluble dietary fiber values measured by enzymatic-gravimetric method in cereal grains. **J. Food Compos. Anal.** 18: 113-120.
- Simi, C. K. and Abraham, T. E. (2008). Physicochemical rheological and thermal properties of Njavara rice (Oryza sativa) starch. **J. Agr. Food Chem.** 56: 12015-12113.

- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S. and Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chem.** 81: 219-231.
- Stevenson, D. G, Jane, J. L. and Inglett, G. E. (2006). Physicochemical properties of pin oak (Quercus palustris Muenchh.) acorn starch. **Starch/Stärke.** 58: 553-560.
- Takahashi, M., Konno, C., and Hikino, H. (1986). Isolation and hypoglycemic activity of coixan A, B, C, glycans of Coix lachryma-jobi L. Var. ma-yuen seeds. **Planta Med.** 52: 64-65.
- Tester, R. F. and Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. effects of amylopectin, amylose, and lipids. **Cereal Chem.** 67(6): 551-557.
- Tracy, P. I., Hoskisson, W. and Thimble, A. J. M. (1943). Wheat germ oil as an antioxidant in dairy products. pp 311-318.
- Tsai, C. E., Yang, L., Su, P., and Chen, R. M-Y. (1998). Beneficial effect of adlay on plasma lipids in hamsters and hyperlipidemic and diabetic patients. **Atherosclerosis.** 136: Supplement 1.p.S43.
- Tseng, Y. H., Yang, J. H., Chiang, H. L. and Mau, J.-L. (2004). Test quality of monocal adlay. **J. Agr. Food Chem.** 52: 2297-2300.
- Tseng, Y. H., Yang, J.-H., Chang, H. L., Lee, Y.-L. and Mau, J.-L. (2006). Antioxidant properties of methanolic extracts from monascal adlay. **Food Chem.** 97: 375-381.
- Varavinit, S., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P. and Naivikul, O. (2003). Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation and pasting properties of flours from different cultivars of Thai rice. **Starch/Stärke** 55: 410-415.
- Vitaglione, P., Napolitano, A. and Fogliano, V. (2008). Cereal dietary fibre: a nature functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut. **Trends Food Sci. Technol.** 19: 451-463.
- Waniska, R. D. (2000). Structure, phenolic compounds and antifungal proteins of sorghum caryopses. Chandrashekar, A., Bandyopadhyay, R., and Hall, A.J. (eds.). Technical and institutional options for sorghum grain mold management: proceedings of an international consultation (pp. 72-106). ICRISAT.
- Wu, T.-T., Charles, A. L. and Huang, T.-Z. (2007). Determination of the contents of the main biochemical compounds of adlay (Coix lachryma-jobi L.). **Food Chem.** 104: 1509-1515.



- Yang, C.-C., Chang, S.-M. and Yan, H.-J. (1998). Adlay starch and its structure of amylopectin. **Bull. Inst. Chem.** 45: 67-78.
- Yang, C. H. and Chang, W. H. (1999). Effects of protein and lipid binding to starch on the physicochemical and pasting properties of rice flour. **J. Food Sci. Agr. Chem.** 1: 277-285.
- Yang, J.-H., Tseng, Y.-H., Chang, H.-L., Lee, Y.-L. and Mau, J.-L. (2004). Storage stability of monascal adlay. **Food Chem.** 90: 303-309.
- Yu, Y. T., Lu, T.-J., Chiang, M.-T. and Chiang, W. (2005). Physicochemical properties of water-soluble polysaccharide enriched fractions of adlay and their hypolipidemic effect in hamsters. **J. Food Drug Anal.** 13(4): 361-367.
- Yuan, Y., Zhang, L., Dai, Y. and Yu, J. (2007). Physicochemical properties of starch obtained from Dioscorea nipponica Makino comparison with other tuber starches. **J. Food Eng.** 82: 436-442.
- Zalatnai, A., Lapis, K., Szende, B., Raso, E., Telekes, A., Resetar, A. and Hidvegi, M. (2001). Wheat germ extract inhibits experimental colon carcinogenesis in F-344 rats. **Carcinogenesis** 22(10): 1649-1652.
- Zhang, G., Ao, Z. and Hamaker, B. R. (2006). Slow digestion properties of native cereal starches. **Biomacromolecules.** 7:3252-3258.

## บทที่ 4

### ผลของการแปรรูปด้วยความร้อนต่อคุณสมบัติทางเคมีและ เคมีกายภาพของแป้งลูกเดือย

#### Effect of thermal processing on chemical and physicochemical properties of Job's tear flour

##### 4.1. บทคัดย่อ

การแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ทำการศึกษาที่ความชื้น 20% 35% 50% อุณหภูมิบารลดระดับต่ำถึงสูง (90, 120, 150 องศาเซลเซียส) และความเร็วของสกรูที่ 150 รอบต่อนาที เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าระดับการเกิดเจลลิตินในเซชัน (degree of gelatinization, DG) ในช่วง 49-91% กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) มีค่าลดลง ดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป โดยการเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารลดระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) ของเอกซ์ทรูเดตมีค่าต่ำกว่าที่สภาวะการทดลองอื่น ๆ โปรไฟล์ความหนืดทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำลายโครงสร้างผลึกซึ่งทำการศึกษาดูด้วยเครื่อง X-ray diffraction ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารลดระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารลดระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีค่าลดลงแต่ DPPH radical scavenging activity และ reducing power มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณ coixenolide มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป

การแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการออโตเคลป ได้ทำการศึกษาที่เวลาในการออโตเคลประยะเวลาต่าง ๆ คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่า DG เท่ากับ 88-98% กระบวนการออโตเคลปมีผลทำให้ปริมาณ SDS มีค่าลดลง ในขณะที่ WAI และ WSI มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อปริมาณ RS เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป โปรไฟล์ความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป กระบวนการออโตเคลปมี

ผลทำลายโครงสร้างผลึกด้วย ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่เวลาในการออโตเคลปที่ 15 และ 60 นาทีมีค่าลดลงแต่ค่า DPPH radical scavenging activity และ reducing power มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ( $p>0.05$ ) เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ในขณะที่ปริมาณ coixenolide ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับเวลาในการออโตเคลป

การศึกษาการแปรรูปแป้งลูกเดี๋ยยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและออโตเคลป ต่อชนิดของสตราซ์ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ ที่ความชื้น 75% และอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส การแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการให้ปริมาณสตราซ์ชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ )

## 4.2 บทนำ

การแปรรูปด้วยการใช้ความร้อน เป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญที่สุดในกระบวนการแปรรูปอาหาร เพื่อให้ได้อาหารที่มีคุณภาพในการบริโภคตามความต้องการ ซึ่งการแปรรูปด้วยความร้อนเป็นวิธีการทำให้อาหารสุกนอกจากนี้ยังช่วยในการถนอมรักษาอาหารได้ด้วย แต่ในขณะเดียวกันการแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนก็มีข้อเสียด้วยเช่นกัน คือ องค์ประกอบทางเคมีบางอย่างในอาหารถูกทำลายซึ่งส่งผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของอาหารลดลง การแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนกับอาหารมีหลากหลายวิธี ซึ่งในการเลือกวิธีการแปรรูปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการแปรรูปผลิตภัณฑ์นั้น ๆ รวมไปถึงความรุนแรงของการแปรรูปด้วยการใช้ความร้อนของแต่ละวิธี โดยแต่ละกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพต่าง ๆ รวมไปถึงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีหรือคุณค่าทางโภชนาการของแต่ละกระบวนการแปรรูปที่เกิดขึ้น เช่น การเกิดเจลลาติในเซชันของสตราซ์ การสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีน การเกิดสารประกอบของอะมิโลสและไขมัน เป็นต้น (Harper, 1981; Bhatnagar และ คณะ, 1994; Ilo และ คณะ, 1999; Bhandari และคณะ, 2001) เช่น งานวิจัยของ Vasanthan และคณะ (2002) ที่ทำศึกษาผลจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณใยอาหารของแป้งข้าวบาร์เลย์ พันธุ์ CDC-Candle และพันธุ์ Pheonix พบว่า ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้และใยอาหารทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นทั้ง 2 พันธุ์หลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันในช่วงอุณหภูมิบารเลที่ 90-140 องศาเซลเซียสและช่วงความชื้นที่ 20-50% หรือในงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิต RS ของ Kim และคณะ (2006) ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันในแป้งสาลีสำหรับทำเพสตรี พบว่า สภาวะการทดลองที่ความชื้น 20 และ 40% ไม่มีผลต่อปริมาณ RS ยกเว้นที่ความชื้น 60% ของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process) พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณ RS Álvarez และคณะ (2005) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการแปรรูปด้วยกระบวนการต่างๆต่อสารทำให้เกิดภูมิแพ้จากลูพีน (lupine) พบว่า

หลังนำเมล็ดคั่วผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 138 องศาเซลเซียสเพียง 5 นาที มีผลทำให้สารที่ทำให้เกิดการแพ้มีปริมาณลดลงมากกว่าการแปรรูปด้วยวิธีการอื่น ๆ งานวิจัยของ Khalil และคณะ (1995) พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีผลให้ปริมาณกรดอะมิโน ลิวซีน ทรีโอนีน และฮิสติดีนในพืชตระกูลถั่วชื่อเฟบา (feba bean) เพิ่มขึ้น และกระบวนการออโตเคลปยังช่วยปรับปรุงความสามารถในการย่อยของโปรตีนและค่า PER value ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และกระบวนการนี้ก็มีผลทำให้ปริมาณแทนนิน สารยับยั้งทริปซินและ haemagglutinin activity มีค่าลดลงด้วย งานวิจัยของ Escarpa และคณะ (1996) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้าง RS ด้วยกระบวนการออโตเคลปแบบใช้ความดันสูงในสตราซมันฝรั่ง พบว่า กระบวนการให้ความร้อนด้วยออโตเคลปแบบใช้ความดันสูงมีผลต่อปริมาณการสร้าง RS มากกว่าการแปรรูปด้วยการต้ม นอกจากผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ยังมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของวัตถุดิบด้วย เช่น งานวิจัยของ Kadan และคณะ (2003) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน รายงานไว้ว่า แป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีคุณสมบัติทางด้านการเกิดความหนืดและดัชนีการดูดซับไขมันของแป้งข้าว (fat absorption index) ที่อุณหภูมิ 55 และ 99 องศาเซลเซียสมีค่าลดลง แต่ส่งผลให้ค่า WAI และ WSI มีค่าเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Ding และคณะ (2005) ที่ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวสาลีหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน รายงานว่า ค่า WAI ค่า WSI และอัตราการขยายตัว (expansion ratio, ER) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับปัจจัยในการผลิต เช่น ความชื้น อัตราการป้อนวัตถุดิบและอุณหภูมิในบารเรล งานวิจัยของ Chang และคณะ (1998) ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพในแป้งลูกเดี๋ย พบว่า การออโตเคลป การให้ความร้อนด้วยไอน้ำและการต้ม มีผลทำให้ค่า WAI ค่ากำลังการพองตัว ค่า DG และเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ที่มีและไม่มีเอนไซม์เปปซินมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่า WSI มีค่าลดลง

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำลูกเดี๋ยมาผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ และศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการแปรรูป อาทิเช่น งานวิจัยของ Kang, Kim และ Hahm (2001) ที่ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปแป้งลูกเดี๋ยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้รายงานไว้ว่า ที่ความชื้น 20-21% ความเร็วรอบสกรูที่ 280-300 รอบต่อนาทีและอุณหภูมิบารเรลที่ 125 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่เหมาะสมในการแปรรูปเอกซ์ทรูเตดจากแป้งลูกเดี๋ย งานวิจัยของ Chang และคณะ (1998) ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่างๆต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของลูกเดี๋ย รายงานว่า ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้รวมถึงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่า WAI ค่า WSI โครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางด้านการเกิดความหนืด ความสามารถในการย่อยด้วยเอนไซม์ (in vitro digestibility) ขึ้นอยู่กับกระบวนการ

แปรรูปที่นำมาใช้ และเมื่อไม่นานนี้ได้มีการนำลูกเด็ยมาเป็นส่วนผสมในแป้งข้าวที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อผลิตเอ็กซ์ทราคต พบว่า คุณสมบัติของเอ็กซ์ทราคตจากแป้งลูกเด็ยผสมแป้งข้าว คือ ค่า ER ค่า WAI ค่า WSI และค่า Hardness ขึ้นกับพันธุ์ของลูกเด็ยและอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวต่อแป้งลูกเด็ย (Yang, Peng, Lui และ Lin, 2008)

จากข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบว่า การแปรรูปด้วยความร้อนด้วยกระบวนการต่าง ๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง รวมไปถึงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านการแปรรูป แต่ก็ยังมีการศึกษาเพียงเล็กน้อยในการจะนำลูกเด็ยมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และผลของการแปรรูปต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากลูกเด็ย รวมไปถึงยังไม่ได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสารชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ antioxidant properties ของแป้งลูกเด็ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทราคชันและกระบวนการออโตเคลปต่อการเปลี่ยนแปลงของสารชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ antioxidant properties และคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแป้งลูกเด็ย เพื่อเป็นอีกทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายให้กับ การนำลูกเด็ยมาแปรรูปนอกเหนือจากการนำลูกเด็ยมาผลิตเป็นน้ำลูกเด็ย หรือนำมาใส่เป็นส่วนประกอบของเครื่องดื่มต่าง ๆ เท่านั้น

### 4.3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 4.3.1 วัตถุดิบ

ลูกเด็ยสายพันธุ์ขาวซื้อจาก บริษัท ขงส่วตี้ฟี่ชผลวังสะพุง จำกัด จังหวัดเลย เอนไซม์ porcine pancrease (P-1750) เอนไซม์ amyloglucosidase (A-7095) และ เอนไซม์ PGO (P-7119) จาก บริษัท Sigma-Aldrich Chemical (St. Louis, MO, U.S.A.)

#### 4.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

นำลูกเด็ยสายพันธุ์ขาวเต็มเมล็ดมาบดเป็นแป้งด้วยวิธีการบดแบบแห้ง โดยใช้เครื่องบดแบบฉ้อน (hammer mill, บริษัท รุ่งเรืองการช่าง จำกัด, ประเทศไทย) จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตร (mesh No. 60)

### 4.3.3 การผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process)

นำแป้งลูกเดี๋ยมาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ ชนิดที่สกรูซ้อนกันแบบหมุนตามกัน (APV MPF 19:25, corotating and intermeshing twin screw extruder, APV Baker, Inc., Grand Rapid, MI, U.S.A.) อัตราส่วนความยาวเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 25:1 มิลลิเมตร ประกอบด้วยบาร์เรล 4 ท่อนเรียงต่อกันและปิดด้วยหัวแบบ (die plate) ที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ผ่านทางถังใส่วัตถุดิบที่ได้ถึงมีเกลียวสกรูเป็นตัวป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron International, Piman, NJ, U.S.A.) โดยทำการศึกษาความชื้นของแป้งลูกเดี๋ยที่ความชื้น 20, 35 และ 50% โปรไฟล์อุณหภูมิของบาร์เรล 3 ระดับ คือ ต่ำ (low barrel temperature, LT) กลาง (middle barrel temperature, MT) และสูง (high barrel temperature, HT) โดยมีอุณหภูมิโซนที่ 1, 2, 3 และ 4 แต่ละระดับประกอบด้วย ระดับต่ำ 40/60/80/90 องศาเซลเซียส ระดับกลาง 60/80/100/120 องศาเซลเซียส และระดับสูง 90/110/130/150 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบของสกรูที่ 150 รอบต่อนาที หลังจากที่มีการปรับเปลี่ยนสถานะและเมื่อค่าแรงทอร์คคงที่ เก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูเดต นำเข้าอบในตู้อบด้วยความร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 21 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเพื่อรอการวิเคราะห์

### 4.3.4 การผลิตด้วยกระบวนการออโตคลอป (autoclave process)

นำแป้งลูกเดี๋ยปรับความชื้นให้มีความชื้นเป็น 75% และบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องออโตคลอป (autoclave, HA-300MN, Hirayama, Japan) ที่มีการปรับช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นของเครื่องเป็น 60 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการศึกษา คือ 120 องศาเซลเซียสและ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ และทำการศึกษาเวลาในการให้ความร้อนที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนเข้าอบในตู้อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 21 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเพื่อรอการวิเคราะห์

### 4.3.5 การเปรียบเทียบการผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและออโตคลอป

#### 4.3.5.1 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำแป้งลูกเดี๋ยมาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่เช่นเดียวกับในข้อ 4.3.3 แต่ทำการปรับความชื้นแป้งลูกเดี๋ยที่ความชื้น 75% และเลือกอุณหภูมิบาร์เรลระดับกลาง (60/80/100/120 องศาเซลเซียส) และใช้ความเร็วรอบสกรูที่ 150 รอบต่อนาที หลังจากที่มีการปรับเปลี่ยนสถานะ

และเมื่อค่าแรงทอร์คคงที่ เก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูคต นำเข้าอบในตู้อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 21 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเพื่อรอการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch, RDS) แป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) และแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS)

#### 4.3.5.2 กระบวนการออโตเคลป

นำแป้งลูกเดี๋ยปรับความชื้นและเข้าเครื่องออโตเคลปเช่นเดียวกับข้อ 4.3.4 ซึ่งทำการศึกษาเวลาในการให้ความร้อนที่เวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนเข้าอบในตู้อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 21 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเพื่อรอการวิเคราะห์ปริมาณ RDS SDS และ RS

#### 4.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณ RDS, SDS และ RS

การวิเคราะห์ปริมาณ RDS, SDS และ RS วิเคราะห์ตามวิธีการของ Englyst และคณะ (1992 และ 1999) โดยชั่งตัวอย่างหนัก 400 มิลลิกรัม และกัวกัมหนัก 50 มิลลิกรัมลงในหลอดเซนทรีฟิวขนาด 85 มิลลิลิตรที่มีลูกแก้วขนาด 1.5 เซนติเมตรจำนวน 5 ลูก จากนั้นเติม 0.1 โมลาร์ สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท (pH 5.2) จำนวน 20 มิลลิลิตร แล้วนำหลอดเซนทรีฟิวแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนานเป็นเวลา 45 นาทีพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Julabo EC, Julabo Labortechnik GMBH, Germany) จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ผสมของ porcine pancrease และ amyloglucosidase ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เมื่อครบเวลาที่ 20 และ 120 นาที ปิดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 0.4 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทรีฟิวที่มีสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และให้นิยามเป็นส่วน G20 และ G120 ตามลำดับ หลังจากครบเวลา 120 นาที นำหลอดเซนทรีฟิวจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส มาแช่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาแช่ในน้ำแข็งเป็นเวลา 20 นาทีและเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 7 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่บรรจุน้ำแข็งเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเปิดตัวอย่างปริมาตร 0.2 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทรีฟิวที่มีสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (50 AGU/มิลลิลิตร) ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีพร้อมกับเขย่าอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเมื่อครบเวลาย้ายหลอดเซนทรีฟิวไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำให้เย็นและเติมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 12 มิลลิลิตร ให้นิยามส่วนนี้ว่า TG (total glucose) สุดท้ายนำส่วน G20

G120 และ TG มาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 3000xg เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หักกลูโคสด้วยสารละลายเอนไซม์ PGO วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 440 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) คำนวณปริมาณ RDS SDS และ RS ตามสูตรข้างล่าง

$$\text{RDS} = \text{G20} \times 0.9$$

$$\text{SDS} = (\text{G120} - \text{G20}) \times 0.9$$

$$\text{RS} = (\text{TG} - \text{G120}) \times 0.9 \text{ หรือ } \text{RS} = \text{TG} - (\text{RDS} + \text{SDS})$$

#### 4.3.7 การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลิตินในเซชัน

วิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลิตินในเซชัน (degree of gelatinization, DG) ตามวิธีการของ Chiang และ Johnson (1977) เตรียมตัวอย่างที่เกิดเจลลิตินอย่างสมบูรณ์ (totally gelatinization sample) โดยนำสารละลายแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปที่มีความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก เข้าเครื่องออโตเคลป (autoclave, HA-300MN, Hirayama, Japan) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเติมสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลายแป้งที่ได้ ปริมาตร 3 เท่าของสารละลายแป้งทั้งหมด ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสมที่ความเร็วสูง และทำการกรองสารละลายแป้งและทำการล้างซ้ำอีก 2 ครั้งด้วยสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำให้แห้งในตู้ดูดความชื้น บดตัวอย่างและร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด mesh No. 80 และเรียกตัวอย่างที่ได้ชื่อว่า “totally gelatinization sample”

ชั่งตัวอย่างแป้งที่ผ่านการให้ความร้อน 20 มิลลิกรัมลงในหลอดเซนทริฟิวขนาด 50 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร สำหรับตัวอย่าง totally gelatinization ชั่งตัวอย่าง totally gelatinization น้ำหนัก 20 มิลลิกรัมและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร หลังจากนั้น 5 นาทีเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (Sigma No.A-7095) ที่ละลายในบัฟเฟอร์อะซิเตท pH 4.5 (เอนไซม์ amyloglucosidase 10 ไมโครลิตรต่อสารละลายบัฟเฟอร์อะซิเตท 25 มิลลิลิตร) ปริมาตร 25 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทริฟิวที่มีตัวอย่างแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนและตัวอย่าง totally gelatinization จากนั้นนำไปบ่มที่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียสพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Julabo EC, Julabo Labortechnik GMBH, Germany) เป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลาที่ 30 และ 60 นาที ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทริฟิวที่มีกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid) เข้มข้น 25% โดยปริมาตร ปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 12500xg เป็นเวลา 5 นาทีและปิเปตสารละลายส่วนใส 0.25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย *o*-toluidine ปริมาตร 2.25 มิลลิลิตรและนำไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่



100 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้เย็นและเติมกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 630 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) คำนวณ DG ตามสูตรข้างล่าง

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

A = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง total gelatinization

B = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 30 นาที

C = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 60 นาที

k = ค่าการดูดกลืนแสงของ 1% of intact sample ที่ผ่านการย่อย 30 นาที

Y = ระดับการเกิดเจลที่ในซ้ของตัวอย่าง (%)

#### 4.3.8 การวิเคราะห์ antioxidant properties

##### 4.3.8.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ antioxidant properties

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หา antioxidant properties แบ่งออกเป็น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolics content) DPPH radical scavenging activity และ reducing power การเตรียมตัวอย่างเตรียมโดยชั่งตัวอย่างแป้งหนัก 10 กรัมและเติมสารละลาย เมทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าอย่างต่อเนื่องในเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำสารละลายตัวอย่างแป้งกรองผ่านกระดาษกรอง whatman No.1 จากนั้นนำตะกอนตัวอย่างมาเติมสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ เขย่าอย่างต่อเนื่องและ กรองอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นรวมสารละลายที่ได้จากการกรองครั้งที่ 1 และ 2 และนำไประเหยด้วย เครื่องระเหยแห้งแบบสูญญากาศ (rotary evaporator, R-114S, Buchi Labortechnik AG, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสจนตัวอย่างแห้ง จากนั้นเก็บตัวอย่างแห้งที่ได้หลังจากการ ระเหยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อรอนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยก่อนการนำมา วิเคราะห์ให้นำตัวอย่างแห้งที่ได้ละลายในสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง ให้ได้ความเข้มข้นของ ตัวอย่างที่ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

##### 4.3.8.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการ ของ Marinova และคณะ (2005) ปีเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4.3.8.1 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร น้ำกลั่นปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร และสารประกอบ Folin-Ciocalteu's phenol ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร

ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเข้มข้น 7% โดยปริมาตร 2 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตร หลังจากปรับปริมาตรแล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 90 นาที เมื่อครบเวลาไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) เทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid) (ในช่วงความเข้มข้นที่ 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร)

#### 4.3.8.3 การวิเคราะห์ DPPH radical scavenging activity

DPPH radical scavenging activity วิเคราะห์ตามวิธีการของ Choi และคณะ (2007) ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4.3.8.1. ปริมาณ 1.2 มิลลิลิตรและสารละลาย DPPH ที่ละลายในสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีในความมืด จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) เทียบกับ blank (DI water) และ control (เมทิลแอลกอฮอล์) กำหนดปริมาณ DPPH radical scavenging activity ตามสูตรดังนี้

$$\text{DPPH radical scavenging activity (\%)} = \frac{[\Delta A_{517} \text{ of control} - \Delta A_{517} \text{ of sample}] \times 100}{\Delta A_{517} \text{ of control}}$$

$\Delta A_{517}$  = ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างหรือ control กับ blank ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร

#### 4.3.8.4 การวิเคราะห์ reducing power

reducing power วิเคราะห์ตามวิธีการของ Choi และคณะ (2007) โดยปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4.3.8.1. ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตดเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ (pH 6.6) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรและสารละลายโพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบเวลาเติมสารละลาย trichloroacetic acid เข้มข้น 10% โดยปริมาตร ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 200xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปิเปตสารละลายส่วนใสปริมาตร 5 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตรกับสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 0.1% โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันและวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตรเทียบกับ blank (DI water) และ control (เมทิลแอลกอฮอล์) ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England)

#### 4.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณ Coixenolide

ปริมาณ coixenolide วิเคราะห์ตามวิธีการของ Yang และคณะ (2004) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณ 2,3-butanediol ที่ได้จากการปลดปล่อยจาก coixenolide ด้วยวิธีการ acid-catalyzed transesterification นำตัวอย่างแป้งมาสกัดไขมันออกด้วยสารละลายไดเอทิลอีเธอร์ตามวิธีการของ AOAC (2000) จากนั้นชั่งไขมันที่ได้จากการสกัดน้ำหนัก 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่และเติมสารละลายเมทานอลิกไฮดรอกลอไรด์ (methanolic hydrochloride หรือ methanolic HCl) เข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำมา reflux ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำให้เย็นลง และปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายเมทานอลิกโซเดียมเมทอกไซด์ (methanolic sodium methoxide) ที่ความเข้มข้น 30% โดยปริมาตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้หลังจากการปรับให้เป็นกลางแล้วมากรองส่วนของเกลือที่เกิดขึ้น และปรับปริมาตรด้วยการระเหยตัวอย่างด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบสูญญากาศ (rotary evaporator, R-114S, Buchi Labortechnik AG, Switzerland) ให้เหลือ 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารมาตรฐาน 1,5-Pentanediol (Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, U.S.A.) เพื่อเป็น internal standard และนำสารละลายผสมที่ได้สุดท้ายฉีดเข้าเครื่อง gas chromatograph (GC) โดยใช้ flame ionization detector (FID) เป็น detector (Varian CP3800, Varian, Co., Ltd., Netherland) และใช้คอลัมน์ CP7420, WCOT fused silica, CP-select CB for FAME 100mx0.25mm, 0.25  $\mu$ m film thickness, Varian, U.S.A. โดยมีอุณหภูมิส่วนฉีดสาร (injector temperature) เป็น 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของสารที่เข้าคอลัมน์กับส่วนที่ระบายออก (split ratio) คือ 1 ต่อ 10 และควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ (column temperature) เริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที และคงไว้ นาน 20 นาที รวมระยะเวลาในการวิเคราะห์เท่ากับ 52 นาที อุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจวัด (detector temperature) เป็น 250 องศาเซลเซียส ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (injection volume) คือ 1 ไมโครลิตร จากนั้นคำนวณปริมาณ coixenolide ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณ 2,3-butanediol โดยคำนวณเทียบกับพื้นที่พีคของ internal standard

#### 4.3.10 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

##### 4.3.10.1 คุณสมบัติการเกิดเพสต์

วิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสต์ (pasting properties) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว rapid visco analyzer (RVA, Newport Scientific, Warriewood, Australia) ซึ่งตัวอย่างจำนวน 2.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงใน RVA canister และเติมน้ำกลั่นลงใน RVA canister ให้มีน้ำหนักรวมทั้งหมดเป็น 27.5 กรัม จากนั้นผสมให้เข้ากัน และใช้โปรแกรมการทำงานด้วย extrusion with no alcohol profile ดังต่อไปนี้ เริ่มต้นการทำงานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 0-1 นาที ด้วยความเร็ว 960 รอบต่อนาที สำหรับ 10 วินาทีแรก แล้วลดลงเป็น 160 รอบต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 1-6 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 25 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 12.50-18.50 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.50 นาที รวมระยะเวลาการทดสอบ 20 นาที ทำการวัดค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสต์ (pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าเบรคดาวน์ (breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่าเซตแบค (setback)

##### 4.3.10.2 ดัชนีการดูดซับน้ำ และดัชนีการละลาย

วิเคราะห์ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) และค่าดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) ตามวิธีการของ Anderson (1969 และ 1982) ซึ่งตัวอย่างแป้ง 1.25 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงในหลอดเซนทริฟิวขนาด 50 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจากนั้นนำไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Ratex SWB20, Instruments PTY., LTD., Australia) เป็นเวลา 30 นาที ครบเวลานำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 3000xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นแยกส่วนใสใสในภาชนะที่ทราบน้ำหนักและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและคำนวณเป็นร้อยละของค่า WSI และนำตัวอย่างแป้งที่เหลือในหลอดเซนทริฟิวมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละของค่า WAI ซึ่งสามารถคำนวณตามสูตรข้างล่าง

$$\text{WAI (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งส่วนตะกอน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักแข็งส่วนที่ละลายที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

#### 4.3.10.3 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Bruker D5005, Bruker GmbH, Germany) โดยใช้วิธีการเดียวกับในข้อ 3.3.7.4 ในส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างของเมล็ดลูกเดือย องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของแป้งและสตาร์ชลูกเดือย

#### 4.3.11 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาสภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ใช้แผนการทดลองแบบ factorial experiment แบบ completely randomized design (CRD) โดยศึกษาตัวแปรของสภาวะการแปรรูป 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิของบาร์เรล และความชื้นของวัตถุดิบ โดยแต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ อุณหภูมิของบาร์เรลเป็นระดับต่ำ (40/60/80/90 องศาเซลเซียส) ระดับกลาง (60/80/100/120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (90/110/130/150 องศาเซลเซียส) และความชื้นของวัตถุดิบ 20, 35 และ 50% และวิเคราะห์ความแปรปรวน analysis of variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรม statistical analysis system (SAS) for windows version 6.12 (SAS Institute Inc., Cary, NC) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี duncan's new multiple's range test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

การศึกษาสภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ใช้แผนการทดลองแบบ CRD โดยศึกษาตัวแปรของสภาวะการแปรรูป 1 ตัวแปร คือ ระยะเวลาของการให้ความร้อนด้วยออโตเคลปที่ 4 ระดับ คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที และวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ด้วยโปรแกรม SAS for windows version 6.12 (SAS Institute Inc., Cary, NC) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

การศึกษากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและออโตเคลปต่อสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการใช้เอนไซม์ ใช้แผนการทดลองแบบ CRD โดยตัวแปรในการศึกษา คือ กระบวนการแปรรูปที่ต่างกัน (เอกซ์ทรูชันและออโตเคลป) และวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ด้วยโปรแกรม SAS for windows version 6.12 (SAS Institute Inc., Cary, NC) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

## 4.4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

### 4.4.1 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

#### 4.4.1.1 ผลของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูปด้วยเอกซ์ทรูชัน

ตัวแปรตามของกระบวนการแปรรูปด้วยเอกซ์ทรูชัน (extrusion) ประกอบด้วย อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ แรงทอร์ก (torque) และความดันบริเวณหัว die (die pressure) ของเอกซ์ทรู เดตแป่งลูกเดียวที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ที่ความชื้น 20% ให้ค่าแรง ทอร์กและความดันบริเวณหัว die สูงสุดเมื่อเทียบกับที่ความชื้น 35 และ 50 % เนื่องจากที่ความชื้น ของวัตถุดิบสูงมีองค์ประกอบของน้ำที่มากกว่าที่ความชื้นของวัตถุดิบต่ำ ซึ่งน้ำเป็นตัวช่วยในการ เคลื่อนที่ของวัตถุดิบ ลดความหนืดของโด และน้ำยังเป็นตัวช่วยในการนำความร้อนระหว่างวัตถุดิบ ได้ดีทำให้ความต้องการพลังงานกลหรือพลังงานรวมทั้งหมดในระบบ เพื่อทำให้วัตถุดิบเกิดการ สุกต่ำลง จึงส่งผลให้ค่าแรงทอร์กและความดันบริเวณหัว die ของการเอกซ์ทรูวัตถุดิบความชื้นสูง มีค่าต่ำกว่าที่ความชื้นของวัตถุดิบต่ำ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในครั้งนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Ho และคณะ (1999)

แรงทอร์กและความดันบริเวณหัว die เป็นอีกตัวแปรตามที่สำคัญในการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยแรงทอร์กและความดันบริเวณหัว die ซึ่งให้เห็นถึงน้ำหนักหรือ แรงต้านทานต่อการหมุนของมอเตอร์ของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งแรงทอร์กและความดันบริเวณหัว die ได้รับผลโดยตรงมาจากสภาวะการแปรรูป และเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะความหนืด ของโดและลักษณะปรากฏของเอกซ์ทรูเดตที่จะได้ออกมา (Lue และคณะ, 1991) ซึ่งจากการทดลอง พบว่า เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงทอร์กและความดันบริเวณหัว die ลดลง เนื่องจากโดภายในบารเรลมีความหนืดลดลง เมื่อมีองค์ประกอบของน้ำอยู่ในส่วนผสมมากขึ้น (Bhattacharya และ Hanna, 1987 และ Lue และคณะ, 1991) และลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่า ที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศา เซลเซียส) ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะพอง (ภาพที่ 4.1) แต่เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีลักษณะพองแต่มีลักษณะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (half product) แต่มี เพียงที่ความชื้น 35% อุณหภูมิบารเรลระดับสูง ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะที่พองเพียง เล็กน้อย (ภาพที่ 4.2 และ 4.3)

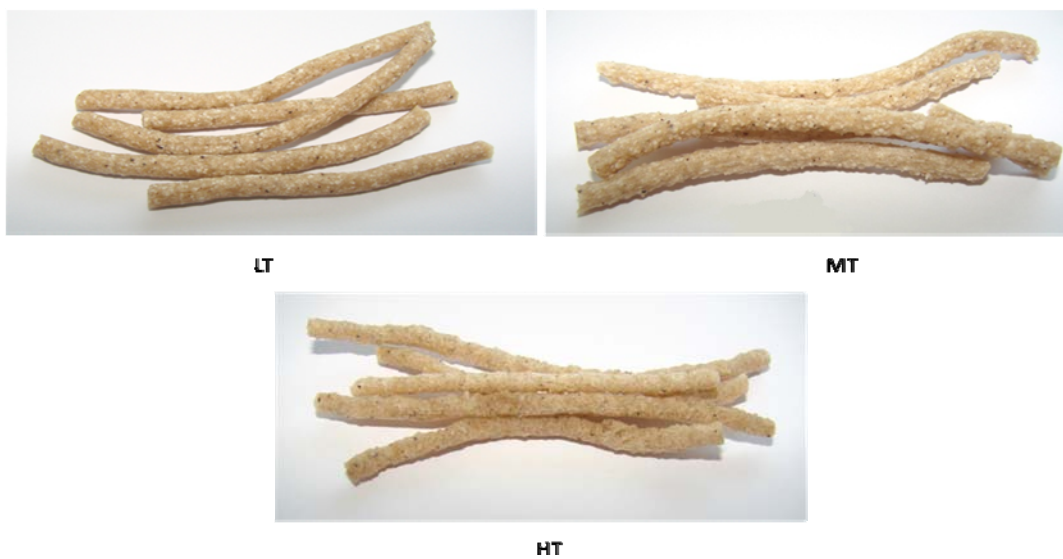
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ แรงทอร์คและความดันบริเวณหัว die

Extrusion conditions	Product temperature	Torque	Die pressure
Feed moisture content (%)-Barrel temperature profile	(°C)	(%)	(KPa)
20-MT	118.00±1.40	92.50±3.50	200.00±14.10
20-HT	149.00±1.40	72.50±3.50	125.00±7.10
35-LT	89.50±0.70	47.50±3.50	45.00±7.10
35-MT	118.50±2.10	34.00±1.40	15.00±7.10
35-HT	148.50±0.70	25.00±0.00	-5.00±7.10
50-LT	89.00±0.00	17.50±3.50	-15.00±7.10
50-MT	121.00±1.40	16.00±5.70	-25.00±21.20
50-HT	148.50±2.10	15.00±0.00	-20.00±14.10

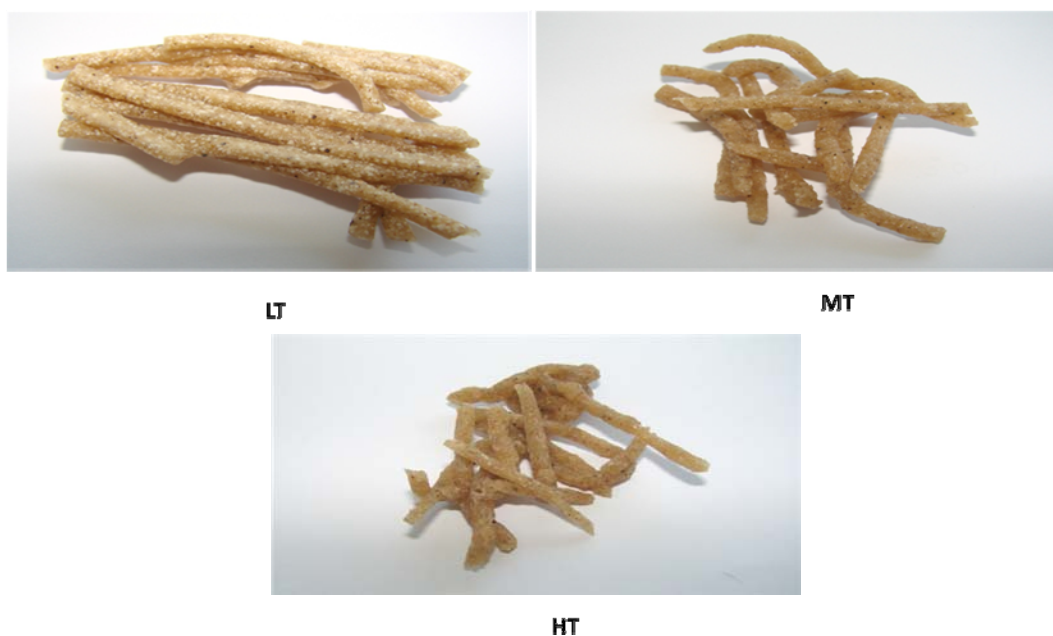
**หมายเหตุ** LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature



ภาพที่ 4.1 ลักษณะปรากฏของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 20% (MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)



**ภาพที่ 4.2** ลักษณะปรากฏของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 35% (LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)



**ภาพที่ 4.3** ลักษณะปรากฏของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 50% (LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)



#### 4.4.1.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (degree of gelatinization, DG) ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ย แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ค่า DG ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ยที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ อยู่ในช่วง 49-91% โดยที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีค่า DG ต่ำที่สุด และที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่า DG มากที่สุด จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ความชื้นและอุณหภูมิบารไม่มีปฏิสัมพันธ์กัน (interaction) ต่อค่า DG ( $p>0.05$ ) (ภาคผนวก ง, ตาราง 1ง) แต่ค่า DG ได้รับอิทธิพลมาจากแต่ละปัจจัย คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า DG จากแต่ละปัจจัยดังภาพที่ 4.4 โดยภาพที่ 4.4a แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า DG จากผลของความชื้นของวัตถุดิบ พบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ค่า DG มีค่าลดลงที่อุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แต่ที่อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของค่า DG ที่อุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส)

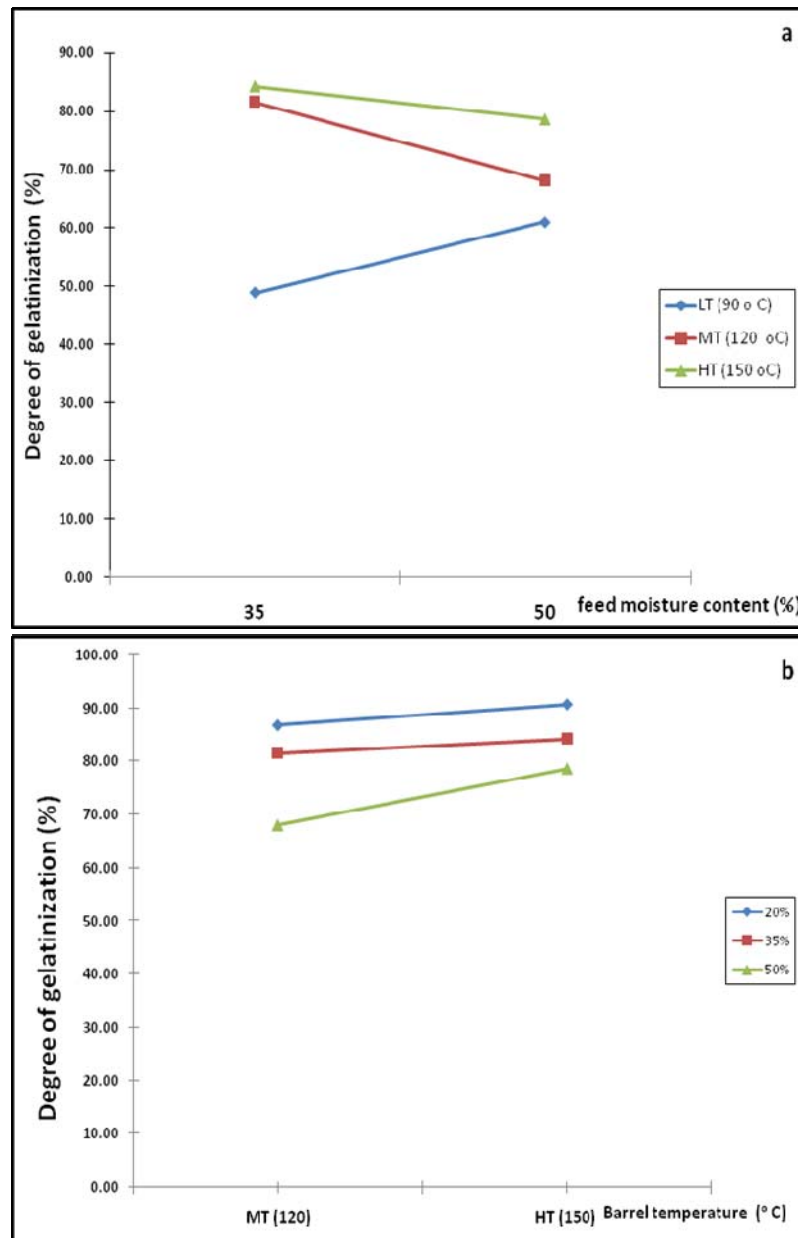
ตารางที่ 4.2 ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Extrusion conditions	Degree of gelatinization (%)
Feed moisture content (%) - Barrel temperature profile	
20-MT	86.73±0.89 <sup>ab</sup>
20-HT	90.61±2.63 <sup>a</sup>
35-LT	48.88±1.91 <sup>g</sup>
35-MT	81.52±1.99 <sup>cd</sup>
35-HT	84.20±0.34 <sup>bc</sup>
50-LT	60.96±0.95 <sup>f</sup>
50-MT	68.07±1.52 <sup>e</sup>
50-HT	78.64±3.56 <sup>d</sup>

**หมายเหตุ** LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เมื่อระดับความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นนั้น เกิดเนื่องจากความชื้นของวัตถุดิบที่สูงขึ้นทำให้ภายในระบบมีปริมาณน้ำมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานรวมภายในระบบรวมทั้งพลังงานความร้อนหรืออุณหภูมิภายในบารเรลมีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลลาทีไนซ์



ภาพที่ 4.4 ผลของความชื้นและอุณหภูมิบารเรลต่อระดับการเกิดเจลลาทีไนซ์ (a= feed moisture content b= barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)

ของสตาร์ชมีปริมาณลดลง ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนเกี่ยวกับการลดลงของค่า DG เมื่อปริมาณน้ำในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น คือ งานวิจัยของณัฐชนก อมรเทวภัทร, เสกสม อาตมางกูร และสายชล เลิศสุวรรณ (2548) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด รายงานว่า ค่า DG ของเอกซ์ทรูเตดจากแป้งข้าวโพดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า DG ที่อุณหภูมิบารเรลดระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เกิดเนื่องจากที่ความชื้นของวัตถุดิบที่ 35 และ 50% เป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำ (low water content) ถึงปานกลาง (intermediate water content) โดยเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาทีไนซ์ (melting temperature,  $T_m$ ) ของสตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) จึงทำให้สตาร์ชสามารถเจลาทีไนซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลาทีไนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้ ในภาพที่ 4.4b แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า DG โดยอุณหภูมิบารเรลด พบว่า เมื่ออุณหภูมิบารเรลดเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิบารเรลดระดับกลางเป็นระดับสูงส่งผลให้ค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความชื้นของวัตถุดิบทุกระดับ เนื่องจากอุณหภูมิบารเรลดที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานภายในระบบทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้น และช่วงอุณหภูมินี้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ  $T_c$  (completion temperature) ของแป้งลูกเดือยพันธุ์ขาว (82.07 องศาเซลเซียส) ทำให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในระบบมีปริมาณมากพอในการทำลายเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลาทีไนซ์ของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิบารเรลดและอัตราการเติมน้ำ (water injection rate) ต่อค่า DG ในเอกซ์ทรูเตดจากข้าวบาร์เลย์ รายงานว่า ค่า DG ของสตาร์ชบาร์เลย์มีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ในเชิงบวกกับอุณหภูมิบารเรลด แต่ค่า DG ของสตาร์ชบาร์เลย์ไม่ได้ขึ้นกับอัตราการเติมน้ำในระหว่างขั้นตอนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Lee, Lim, Lim, และ Lim, 2000) แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า DG ของเอกซ์ทรูเตดจากสตาร์ชบาร์เลย์มีผลมาจากอุณหภูมิบารเรลด โดยเมื่ออุณหภูมิบารเรลดมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.4.1.3 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์

ผลของตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรลดต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ (in vitro starch fraction) แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า แป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch, RDS) ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมี

ปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RDS เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน เช่น การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้เป็นการแปรรูปโดยอาศัยความร้อนและแรงเฉือนเพื่อทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบซึ่งมีองค์ประกอบของสตาร์ช โปรตีน และไขมัน เป็นต้น ซึ่งการทำลายโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลให้ลักษณะหรือความแข็งแรงของโครงสร้างที่ต้านทานการย่อยของเอนไซม์มีปริมาณน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้แป้งเกิดเจลาทิไนซ์ (gelatinize) และเดกซ์ทริไนซ์ (dextrinize) จึงทำให้ในช่วงแรกของการย่อยด้วยเอนไซม์ผสมระหว่าง pancrease และ amyloglucosidase สามารถที่จะเข้าไปย่อยในส่วนของแป้งที่ถูกเจลาทิไนซ์ และถูกเดกซ์ทริไนซ์ได้ก่อนอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้ปริมาณ RDS มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อน (Hagenimana และคณะ, 2006) การที่ปริมาณ RS ของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูปนั้น อาจเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชมีโอกาสเกิดได้น้อย ดังผลการศึกษาก่อนเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยที่พบว่า ต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยนานถึง 39 วัน จึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณ RS type 3 ซึ่งเป็น RS ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชของลูกเดี๋ยมีปริมาณน้อยด้วย ทำให้ปริมาณ RS ของแป้งลูกเดี๋ยโดยรวมนั้นมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป

เมื่อพิจารณาปริมาณ RDS SDS และ RS ของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ พบว่า ปริมาณ RDS SDS และ RS มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่มีบางสภาวะการทดลองบางสภาวะการทดลองที่มีปริมาณ RDS SDS และ RS ที่ให้ค่าทางสถิติที่แตกต่าง เช่น ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารละระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ให้ปริมาณ RDS สูง และที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารละระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีปริมาณ RDS ต่ำ หรือปริมาณ SDS มีค่าต่ำที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารละระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และมีค่าสูงที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารละระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) หรือปริมาณ RS มีค่าสูงที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารละระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และมีค่าต่ำที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% และอุณหภูมิบารละระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ซึ่งที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารละระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีปริมาณ RDS ต่ำส่งผลให้มีปริมาณ SDS ที่สภาวะการทดลองนี้มีค่าสูง อาจเกิดเนื่องจากที่สภาวะการทดลองนี้เป็นสภาวะการทดลองที่มีค่า DG ต่ำที่สุด มีผลให้สัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มีปริมาณมาก

ตารางที่ 4.3 สภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วย เอนไซม์

Extrusion conditions Feed moisture content(%)-Barrel temperature profile	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)
Native flour	13.99±0.25 <sup>c</sup>	45.07±1.74 <sup>a</sup>	40.98±1.02 <sup>ab</sup>
20-MT	25.92±0.32 <sup>ab</sup>	33.49±1.43 <sup>bcd</sup>	40.59±1.12 <sup>ab</sup>
20-HT	25.71±0.29 <sup>ab</sup>	33.43±1.63 <sup>bcd</sup>	40.86±1.93 <sup>ab</sup>
35-LT	24.81±0.26 <sup>b</sup>	35.54±1.06 <sup>b</sup>	39.65±1.31 <sup>ab</sup>
35-MT	26.31±0.64 <sup>ab</sup>	31.07±1.78 <sup>d</sup>	42.63±2.42 <sup>a</sup>
35-HT	26.66±1.78 <sup>a</sup>	31.74±1.76 <sup>cd</sup>	41.60±0.02 <sup>ab</sup>
50-LT	26.39±0.05 <sup>ab</sup>	34.86±0.80 <sup>bc</sup>	38.75±0.76 <sup>b</sup>
50-MT	25.53±0.22 <sup>ab</sup>	34.53±2.40 <sup>bcd</sup>	39.94±2.62 <sup>ab</sup>
50-HT	26.13±0.38 <sup>ab</sup>	34.08±0.44 <sup>bcd</sup>	39.79±0.82 <sup>ab</sup>

**หมายเหตุ** RDS= rapidly digestible starch SDS= slowly digestible starch RS= resistant starch

LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

กว่าแป้งที่เจลาทีไนซ์ เป็นผลให้เอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองสามารถที่จะเข้าไปย่อยในช่วงแรก ซึ่งเป็นการย่อยในส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นเหตุให้ปริมาณ RDS ที่วัดได้มีปริมาณต่ำ หลังจากนั้นจึงเป็นการย่อยในส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ ซึ่งที่สภาวะการทดลองนี้มีสัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์สูง เป็นสาเหตุให้ปริมาณ SDS ที่วัดได้มีค่าสูง

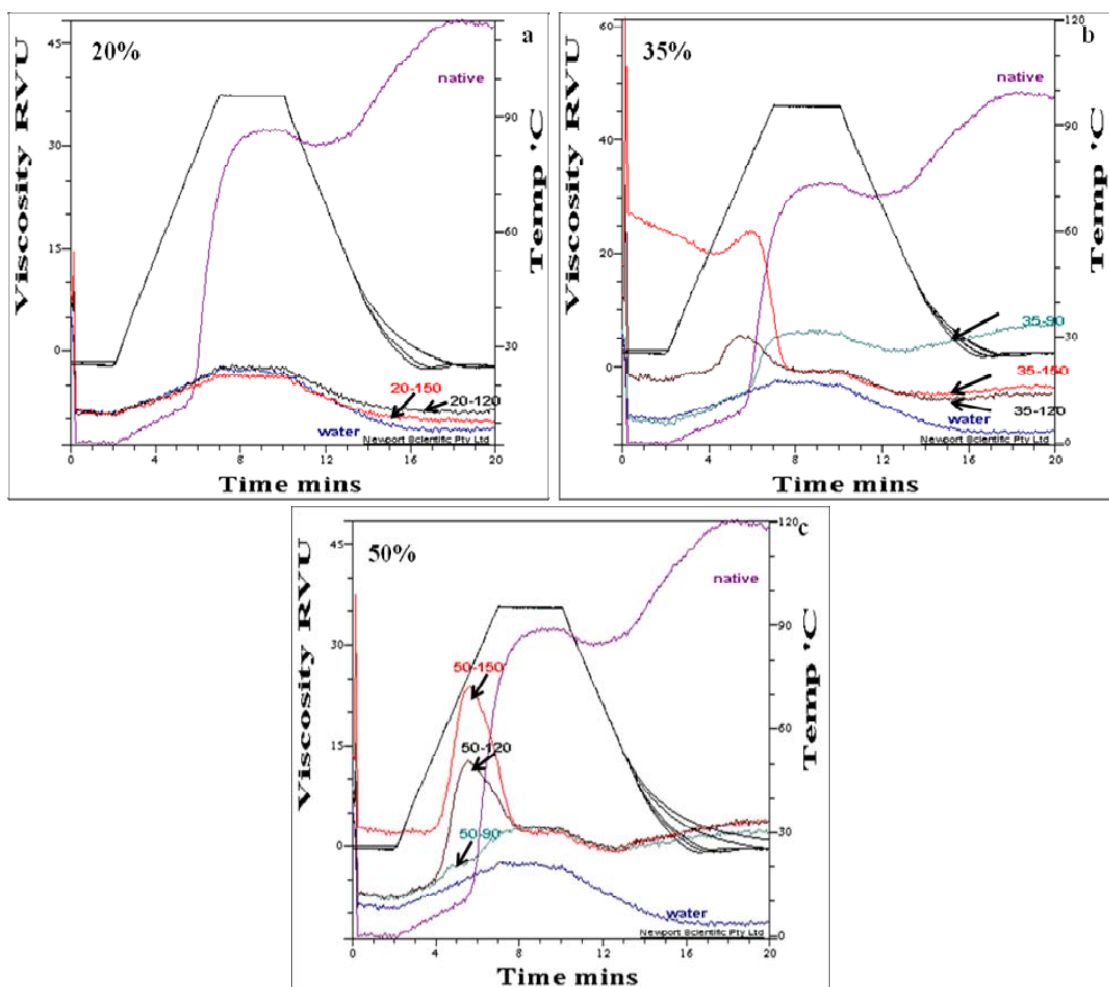
การเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS SDS และ RS ขึ้นกับหลายปัจจัย ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติชี้ให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบาเรลที่ระดับต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS, SDS และ RS ของแป้งลูกเดือย (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 2ง-4ง) ซึ่งปัจจัยภายในที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการย่อยของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ อาทิเช่น การเกิดการจับกันระหว่างสตาร์ชและโปรตีน (starch-protein interaction) ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) ระดับการเกิดรีโทรเกรดชัน (degree of retrogradation) และ DG เป็นต้น (Lai และคณะ, 2000; Englyst และคณะ, 1992; Holm และคณะ, 1983; Hoover และ Sosulski, 1985; Ring และคณะ, 1987) ซึ่งในที่นี้พบว่า การที่ปริมาณ RDS SDS และ RS ของแป้งลูกเดือยที่ไม่

เปลี่ยนแปลงหลังผ่านการแปรรูปนั้น เกิดเนื่องจากแป้งลูกเดี๋ยที่นำมาใช้ในการแปรรูปมีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ มากมาย เช่น โปรตีน ไขมัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนในการขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยสลาย โดยจากการศึกษาทางด้านโครงสร้างของลูกเดี๋ย ทำให้ทราบว่าเม็ดสตาร์ชของลูกเดี๋ยถูกห้อมล้อมด้วยโปรตีนทั้งในรูปแบบที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช หรือที่อยู่อิสระ ดังนั้น โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองจึงมีโอกาสดำเนินไปได้อย่างยากยิ่ง แม้ว่าการแปรรูปด้วยความร้อน มีส่วนช่วยทำให้แป้งเกิดเจลาทิไนซ์และเดกซ์ทริไนซ์ นอกจากนี้ การให้ความร้อนในการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันอาจมีส่วนช่วยทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมัน หรือส่งเสริมการจับกันระหว่างสตาร์ชและโปรตีน ซึ่งสารทั้ง 2 นี้มีผลให้โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองมีโอกาสดำเนินไปได้อย่างยิ่งขึ้น นอกจากนี้ จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DG กับปริมาณ RDS SDS และ RS พบว่า ค่า DG ไม่มีสหสัมพันธ์กับปริมาณ RDS SDS และ RS ( $p > 0.05$ ) (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 7ง) หรือคือ ค่า DG ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นกับปริมาณ RDS SDS และ RS ซึ่งในการทดลองนี้ พบว่า DG ที่ระดับ 48.88-90.61% จากสภาวะการทดลองต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS SDS และ RS นอกจากนี้ จากการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยนั้น โอกาสการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ช้าของลูกเดี๋ยดังที่อธิบายข้างต้นนั้นแม้ว่าการทดลองที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ มีผลให้การเกิดเจลาทิไนซ์และเดกซ์ทริไนซ์ของสตาร์ชที่สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ทำให้โอกาสการสร้าง RS type 3 จากสตาร์ชที่ถูกเจลาทิไนซ์ หรือเดกซ์ทริไนซ์ในลูกเดี๋ยมีโอกาสน้อย ส่งผลให้ปริมาณ RS รวมไม่แตกต่างกันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

#### 4.4.1.4 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์

ผลของตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลตต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ (pasting properties) ของแป้งเปียก แสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันทุกสภาวะการทดลองมีค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าหลังผ่านการตัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้รายงานว่าคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดแป้งข้าวเจ้ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการตัดแปร เมื่อเปรียบเทียบโปรไฟล์ความหนืด (pasting profile) ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันหรือเอกซ์ทรูเด พบว่า โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลอง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิบารเลตต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเด (ภาพที่ 4.5) พบว่า ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารเลตระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ไม่

สามารถเห็นพีคความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (cold peak viscosity, CPV) (ภาพที่ 4.5a) ซึ่งลักษณะโปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีโปรไฟล์ความหนืดใกล้เคียงกับโปรไฟล์ความหนืดของน้ำ ในขณะที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35 และ 50% สามารถเห็นลักษณะ CPV ได้ที่อุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แต่ไม่สามารถเห็นลักษณะ CPV ได้ที่อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ทั้งที่ความชื้น 35 และ 50% (ภาพที่ 4.5 b และ c) แต่เมื่ออุณหภูมิบารเพิ่มขึ้นจากระดับกลางสู่ระดับสูง พิค CPV ของเอกซ์ทรูเดต



ภาพที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิบารต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (a= ความชื้นที่ 20% b = ความชื้นที่ 35% และ c= ความชื้นที่ 50%)

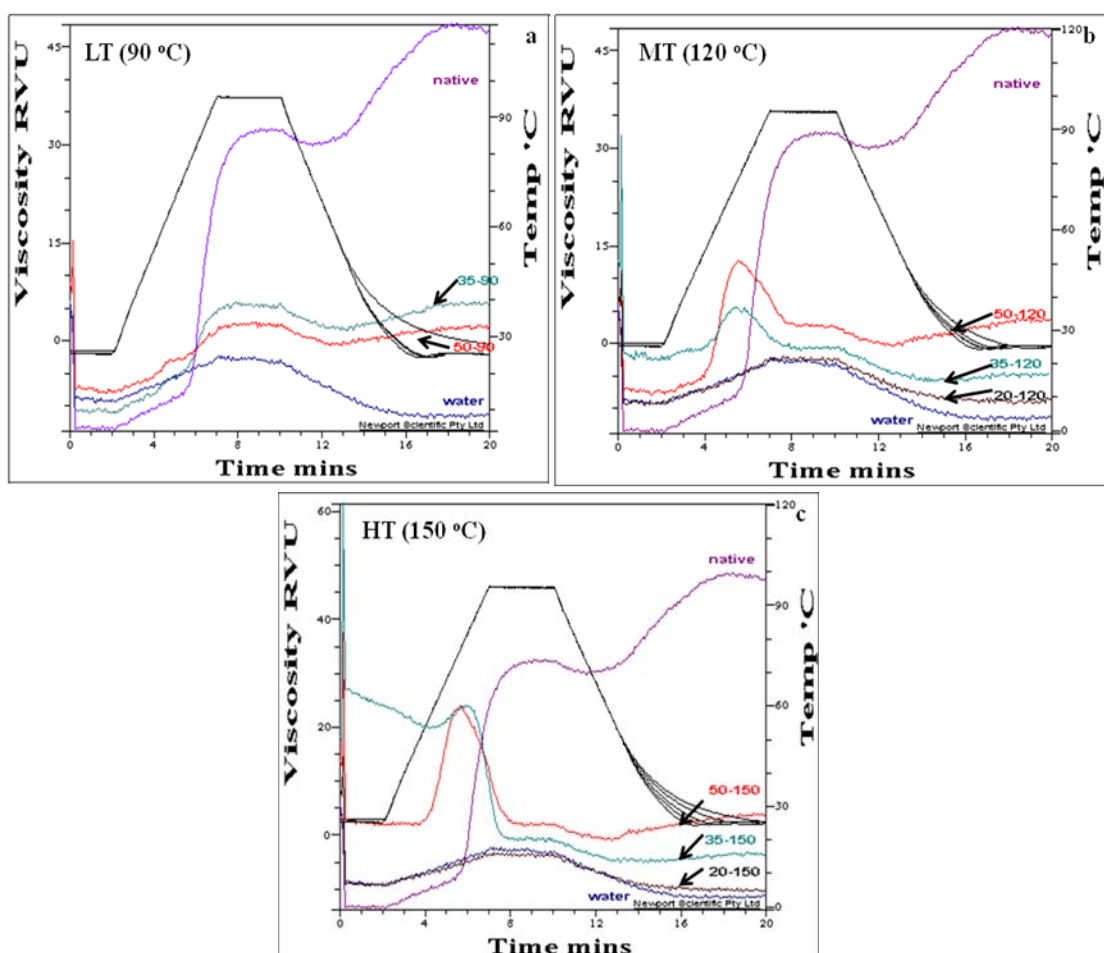
ที่ความชื้น 35 และ 50% มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kadan, Bryant และ Pepperman (2003) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวเกี่ยวกับคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งเปียกที่ว่า พิก CPV ของเอกซ์ทรูเดตแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น

ความแตกต่างของความหนืดที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ กลางและสูงมีสาเหตุเนื่องมาจาก ความแตกต่างของอัตราส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์ต่อแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ หรืออธิบายได้ในเทอมของค่า DG และความแตกต่างของปริมาณการแตกตัวของโมเลกุลสตาร์ช (Gutkoski และ Dash, 1999; Hagenimana และคณะ, 2006) ซึ่งเกิดจากความร้อนและแรงเฉือนจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยพิก CPV ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลางและสูงเกิดจากความหนืดจากส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์แล้ว ซึ่งมีความสามารถในการดูดน้ำและเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดความหนืดในช่วงต้น และการเพิ่มขึ้นของพิก CPV เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แป้งที่เจลาทีไนซ์สามารถดูดซับน้ำและเกิดความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความหนืดที่เกิดขึ้นในช่วงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการวิเคราะห์ด้วย RVA จาก 25 ถึง 95 องศาเซลเซียสของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เกิดขึ้นจากส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ จึงทำให้ความหนืดที่เกิดขึ้นเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า และมีลักษณะรูปแบบความหนืดคล้ายคลึงกับของแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป (native)

เมื่อพิจารณาผลของความชื้นต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดต (ภาพที่ 4.6) พบว่า เมื่อปริมาณความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.6 b และ c) มีผลให้โปรไฟล์ความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเฉพาะที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แต่ที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นส่งผลให้โปรไฟล์ความหนืดมีค่าลดลง (ภาพที่ 4.6 a) ความแตกต่างของโปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตจากผลของความชื้น เกิดเนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์กับแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ โดยที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลางและระดับสูงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์มีค่าลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า DG (ภาพที่ 4.4 a) มีผลให้สัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์มีปริมาณมากขึ้น โดยความหนืดที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ด้วย RVA ในช่วงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ความหนืดที่เกิดขึ้นในช่วงแรกเป็นส่วนที่มาจากแป้งที่เจลาทีไนซ์ แต่หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ ความหนืดที่เกิดขึ้นในส่วนนี้ส่วนใหญ่มาจากส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ ดังนั้น เมื่อสัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้โปรไฟล์ความหนืดโดยรวมมีค่าสูงขึ้น สำหรับโปรไฟล์ความหนืดที่ลดลงของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้น เกิดเนื่องจาก



ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35 และ 50% เป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงปานกลาง เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ทำให้ค่า  $T_m$  ของสตาร์ชลดลง (Roos, 1995) ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณการเกิดเจลลิตีไนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีส่วนของแป้งที่เจลลิตีไนซ์มากกว่าของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35% ดังจะเห็นได้จากค่า DG (ภาพที่ 4.4a) โดยค่า DG ของเอกซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% (60.96%) มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 35% (48.88%) จึงทำให้โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35% มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 50% เนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนของแป้งที่เจลลิตีไนซ์กับแป้งที่ไม่เจลลิตีไนซ์ ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น (Hagenimana และคณะ, 2006)



ภาพที่ 4.6 ผลความชื้นของวัตถุดิบต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (a= low barrel temperature; LT, b= medium barrel temperature; MT และ c= high barrel temperature; HT)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของเอกซ์ทรูเดตที่ทุกสภาวะการทดลองด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ลักษณะช่วงโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิ바เรระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายลดต่ำลงแตกต่างจากลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายของแป้งลูกเดี๋ย ที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ที่อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายมีลักษณะใกล้เคียง กับลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายของแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ให้ค่าความหนืดสุดท้ายที่ต่ำกว่าแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้าย เกิดเนื่องจาก หลังจากส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์เกิดการดูดน้ำ และเกิดเจลเพื่อให้เกิดความหนืดแล้ว เมื่อแป้งที่เจลาทิไนซ์ยังได้รับแรงเฉือนจากการกวนตลอดเวลา จากเครื่อง RVA มีผลทำให้แป้งที่เจลาทิไนซ์เกิดการแตกตัวของโมเลกุลแป้งหรือสตาร์ช และไม่สามารถทนต่อแรงเฉือนของเครื่องที่ให้ไว้ หรือกล่าวคือความแข็งแรงของโครงสร้างของแป้งหรือสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลงจากความร้อนในการแปรรูป ส่งผลให้โปรไฟล์ของความหนืดมีค่าลดลง สำหรับโปรไฟล์ความหนืดช่วงความหนืดสุดท้ายของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ ที่ให้ลักษณะที่ใกล้เคียงกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป เนื่องจาก เอกซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองนี้ยังคงเหลือส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์อยู่ ซึ่งแป้งในส่วนนี้ที่ทำหน้าที่แสดงโปรไฟล์ความหนืดช่วงความหนืดสุดท้ายให้คล้ายคลึงกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่การเอกซ์ทรูเดตสภาวะการทดลองนี้ที่มีบางส่วนของแป้งเจลาทิไนซ์จึงมีผลให้ความหนืดที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง

คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ยที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลองและชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ เช่น งานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) พบว่า โปรไฟล์ความหนืดที่เกิดขึ้นของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวเจ้าจากสภาวะการทดลองที่ความชื้น 16% อุณหภูมิที่หัว die 100 องศาเซลเซียสและความเร็วรอบสกรู 200 รอบต่อนาทีมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับโปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 16% อุณหภูมิที่หัว die 130 องศาเซลเซียสและความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที ซึ่งจากงานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในบางกรณีของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ย เนื่องจากที่สภาวะการทดลองที่ปริมาณความชื้นในระดับเดียวกันแต่อุณหภูมิ바เรที่แตกต่างกัน ซึ่งในการศึกษานี้พบว่า ที่ความชื้น 20% โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่เกิดขึ้นอุณหภูมิ바เรระดับกลาง ให้โปรไฟล์ความหนืดที่สูงกว่าที่อุณหภูมิระดับสูง แต่ไม่สอดคล้องกับที่ความชื้น 50% ซึ่งให้โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ยที่อุณหภูมิ바เรระดับสูงมีค่าสูงที่สุดและลดลงเมื่ออุณหภูมิ바เรลดลง

#### 4.4.1.5 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.7 พบว่า ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ยที่ความชื้น 35 และ 50% มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ที่ความชื้น 20% ค่า WAI มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) กับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป เมื่อพิจารณาเรื่องอุณหภูมิบาเรล พบว่า ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบาเรลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kadan, Bryant และ Pepperman (2003) ที่ทำการศึกษาคณสมบัติเชิงหน้าที่ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ได้รายงานค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบาเรลเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของค่า WAI พบว่า ความชื้นและอุณหภูมิบาเรลมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันต่อค่า WAI ( $p<0.05$ ) (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 5 ง) คือ ที่อุณหภูมิบาเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ค่า WAI มีค่าลดลงเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% แต่ที่อุณหภูมิบาเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% (ภาพที่ 4.7a) และที่ความชื้นทุกระดับเมื่ออุณหภูมิบาเรลเพิ่มขึ้นค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.7b) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ยที่ได้หลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่แตกต่างกันของแต่ละสภาวะการทดลอง เกิดจากปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างผลของความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบาเรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bryant, Kadan, Champagne, Vinyard และ Boykin (2001) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่และคุณสมบัติเกี่ยวกับการย่อยของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวขึ้นกับสภาวะการทดลองและวัตถุดิบที่นำมาแปรรูป เช่น ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของบาเรลเพิ่มขึ้นค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ ในขณะที่ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวเม็ล็ดยาวขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาเรล

การลดลงของค่า WAI เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% ที่อุณหภูมิบาเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในระบบส่งผลให้ค่า DG มีค่าลดลง โดยปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานรวมภายในระบบรวมทั้งพลังงานความร้อนหรืออุณหภูมิภายในบาเรลมีค่าลดลง ซึ่งทำให้สัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีค่ามากกว่าแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35% ซึ่งส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้น้อยกว่าแป้งที่เจลาทิไนซ์ ดังนั้นการที่เอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% ที่มีปริมาณแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มีค่ามากกว่าเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35% ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% สามารถดูดซับน้ำได้น้อยกว่าที่ความชื้น 35% หรือคือมีค่า WAI น้อยกว่า

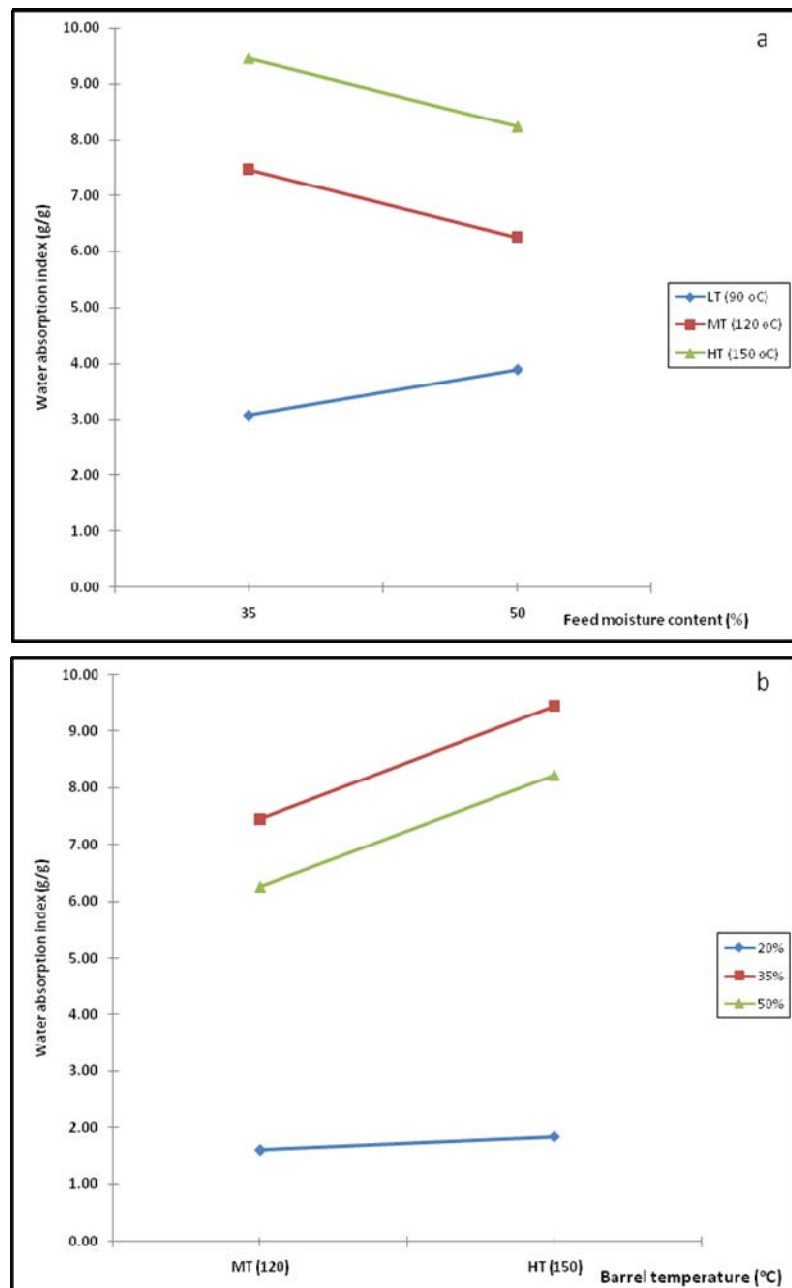
ตารางที่ 4.4 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

Extrusion conditions		WAI (g/g)	WSI (%)
Feed moisture content(%)-Barrel temperature profile			
	Native flour	2.27±0.04 <sup>ef</sup>	9.08±0.12 <sup>g</sup>
	20-MT	1.62±0.06 <sup>f</sup>	62.69±0.39 <sup>b</sup>
	20-HT	1.85±0.11 <sup>f</sup>	66.42±1.30 <sup>a</sup>
	35-LT	3.08±0.03 <sup>de</sup>	16.96±1.86 <sup>d</sup>
	35-MT	7.47±0.00 <sup>b</sup>	22.15±1.03 <sup>c</sup>
	35-HT	9.45±0.14 <sup>a</sup>	11.61±0.09 <sup>f</sup>
	50-LT	3.90±0.29 <sup>d</sup>	18.94±0.16 <sup>d</sup>
	50-MT	6.26±1.38 <sup>c</sup>	14.55±0.33 <sup>c</sup>
	50-HT	8.24±0.13 <sup>b</sup>	11.88±1.02 <sup>f</sup>

**หมายเหตุ** WAI = water absorption index WSI = water solubility index LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ที่ความชื้น 35% จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่า WAI มีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิบารเรลระดับเดียวกันนี้เมื่อพิจารณาเพิ่มขึ้นของค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดทที่ความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 35% พบว่า ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 2 อุณหภูมิบารเรล ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า WAI นั้น เกิดเนื่องจากที่ระดับความชื้นของวัตถุดิบทั้ง 2 ระดับนี้จัดอยู่ช่วง ความชื้นระดับต่ำทั้งคู่ แต่การลดลงของค่า  $T_m$  จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (Roo, 1995) ดังนั้น  $T_m$  ของเอกซ์ทรูเดทที่ความชื้น 35% จะมีค่าต่ำกว่าของเอกซ์ทรูเดทที่ความชื้น 20% ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดทที่ความชื้น 35% สามารถเจลาทิไนซ์ได้มากกว่าเอกซ์ทรูเดทที่ความชื้น 20% มีผลให้แป้งที่เจลาทิไนซ์ของเอกซ์ทรูเดทที่ความชื้น 35% มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 20% ส่งผลให้ปริมาณของแป้งที่สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้หรือคือค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดทที่ความชื้น 35% มากกว่าที่ความชื้น 20% เป็นเหตุให้ที่อุณหภูมิบารเรล 2 ระดับนี้ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 35% (Owusu และคณะ, 1993) สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า WAI ที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% เนื่องจากเป็นช่วงของความชื้นจัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงกลาง โดยเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ทำให้ค่า  $T_m$  ของ

สตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) ทำให้ปริมาณการเกิดเจลลาทีนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ที่สภาวะการทดลองของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีสัดส่วนของแป้งที่เจลลาทีนซ์มากกว่าแป้งที่ไม่เจลลาทีนซ์ มีผลให้แป้งที่เจลลาทีนซ์สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้มากกว่าที่ความชื้น 35%



ภาพที่ 4.7 ผลของความชื้นและอุณหภูมิ barrel ต่อดัชนีการดูดซับน้ำ (a= feed moisture content b= barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)

จึงเป็นเหตุให้ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า WAI เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานรวมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลให้แป้งถูกเจลาทิไนซ์ได้มากขึ้น ทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามพลังงานของระบบที่เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น

ดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดี๋ยมีค่าสูงขึ้นหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันในทุกสภาวะการทดลองต่าง ๆ ซึ่งค่า WSI มีความสัมพันธ์กับระดับการแตกของโมเลกุล (degree of molecular damage) (Bryant และคณะ, 2001) และขึ้นกับปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ เช่น โปรตีน เป็นต้น (Guba และคณะ, 1997) ดังนั้น การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเฉือน ทำให้โมเลกุลของสตาร์ชถูกทำลายด้วยแรงกล แรงเฉือนและความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างหรือโมเลกุลของสตาร์ชในบางส่วนเกิดการเปิดออกและ/หรือหลุดออกจากเม็ดสตาร์ช มีผลให้โมเลกุลสตาร์ชขนาดเล็กสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น และสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่าโมเลกุลสตาร์ชขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดของโมเลกุลสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสัมผัสของโมเลกุลมากกว่าโมเลกุลสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น การที่สตาร์ชถูกทำลายทำให้มีระดับการแตกของโมเลกุลมากขึ้นมีผลให้ของแข็งที่ละลายได้นั้นหลุดออกมามีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าการวิเคราะห์ทางสถิติของค่า WSI พบว่า ความชื้นและอุณหภูมิบารเรลไม่มีปฏิสัมพันธ์กันต่อค่า WSI ( $p > 0.05$ ) แต่ค่า WSI ได้รับอิทธิพลมาจากแต่ละปัจจัยของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรล (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 6ง) ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบค่า WSI ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ตามแต่ละปัจจัย โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันจากปัจจัยเรื่องความชื้นของวัตถุดิบ พบว่า เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ค่า WSI มีค่าลดลงที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ซึ่งค่า WSI ที่ลดลงของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bryant และคณะ (2001) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่และคุณสมบัติเกี่ยวกับการย่อยของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ที่รายงานว่า ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวมีค่าลดลงเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Gujral, Singh และ Singh, (2001) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของเอกซ์ทรูเดต corn grit พันธุ์ฟลินท์ (flint) และข้าวโพดหวาน (sweet corn) รายงานว่าค่า

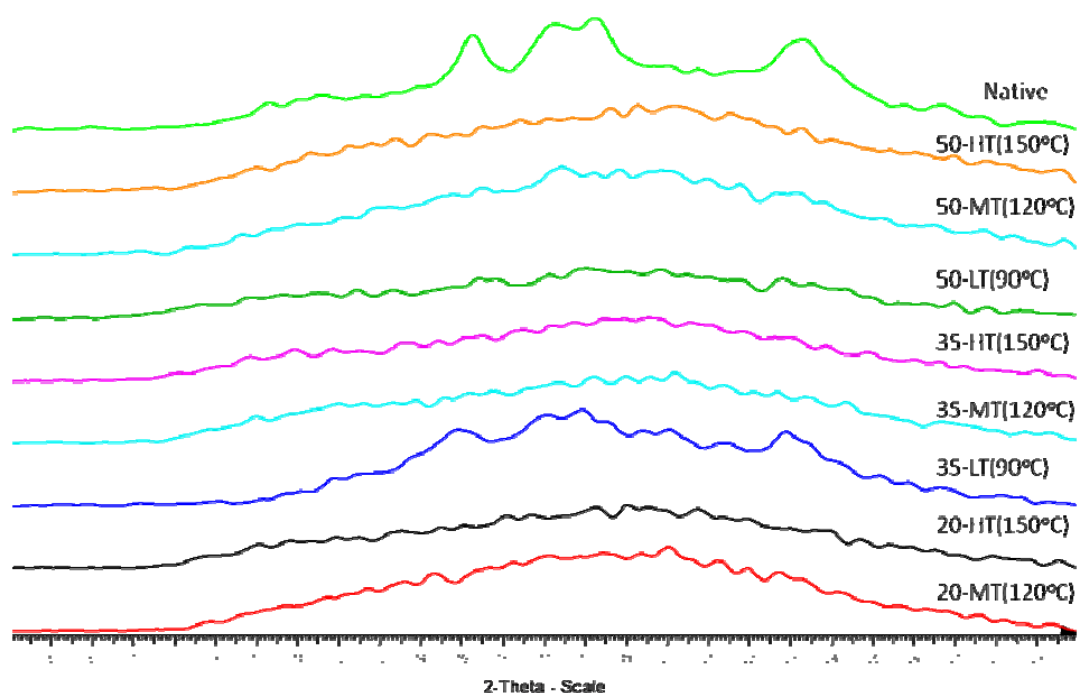
WSI ของเอกซ์ทรูเดต corn grit พันธุ์ฟิลินท์และข้าวโพดหวานมีค่าลดลงเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) รายงานว่า เมื่อความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวเจ้ามีค่าลดลงเช่นกัน การลดลงของค่า WSI เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลางและสูงเนื่องจาก ที่อุณหภูมิทั้ง 2 ระดับนี้เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำภายในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้พลังงานรวมในระบบมีค่าลดลงมีผลให้ปริมาณแป้งที่เจลาทีไนซ์มีปริมาณลดลง แต่เหลือส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์มากกว่า ซึ่งมีแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์มีโครงสร้างของเม็ดแป้งที่แข็งแรง ดังนั้น โอกาสของการหลุดออกจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชบางส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ รวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถละลายได้ในน้ำ เช่น โปรตีนหรือแร่ธาตุ เป็นต้น มีโอกาสการหลุดออกน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณต่ำ ส่งผลให้ค่า WSI มีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดือยมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงกลาง เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ทำให้ค่า  $T_m$  ของสตาร์ชลดลง (Roos, 1995) ทำให้ปริมาณการเกิดเจลาทีไนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ที่สภาวะการทดลองของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีสัดส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์มากกว่าส่วนที่ไม่เจลาทีไนซ์ มีผลให้โอกาสการหลุดออกจากโครงสร้างของสตาร์ชบางส่วน รวมถึงองค์ประกอบโปรตีนและแร่ธาตุของแป้งที่เจลาทีไนซ์มีมากกว่าแป้งที่ไม่เจลาทีไนซ์ซึ่งมีผลให้ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 35%

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันจากปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิบารเรล พบว่า ที่ความชื้น 35 และ 50% เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ไปสู่ระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นถึงระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความชื้นของวัตถุดิบที่ 20 และ 35% แต่ที่ความชื้น 50 % ค่า WSI มีค่าลดลง การเพิ่มขึ้นของค่า WSI เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำถึงระดับสูงของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 20 และ 35% เนื่องจากอุณหภูมิบารเรลที่เพิ่มขึ้นมีผลให้พลังงานรวมในระบบมากขึ้น ปริมาณแป้งที่เจลาทีไนซ์มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีผลให้สัดส่วนของของแข็งที่สามารถหลุดออกจากโครงสร้างมีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งค่า WSI เพิ่มขึ้น แต่หากเพิ่มอุณหภูมิต่อมีผลให้ค่า WSI มีค่าลดลงนั้น โดยปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่สูง มีส่วนช่วยทำให้พลังงานในระบบมีค่าลดลงได้มากกว่าที่ระดับความชื้นอื่นถึงแม้ว่าอุณหภูมิบารเรลจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า WSI ในช่วงอุณหภูมิระดับต่ำถึงกลางเนื่องจากส่วนของแป้งที่เจลาทีไนซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นผลให้โอกาสการหลุดออกจาก

โครงสร้างสตาร์ชและปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นอีกมีผลให้สตาร์ชเกิดการกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชัน (dextrinization) ทำให้โมเลกุลสตาร์ชมีขนาดเล็กลงและสามารถรวมตัวกันได้ ซึ่งทำให้ปริมาณสตาร์ชบางส่วนที่หลุดออกจากโครงสร้างมีปริมาณลดลงเป็นเหตุให้ค่า WSI มีค่าลดลง (Ding, Ainsworth, Plunkett, Tucker และ Marson, 2006)

#### 4.4.1.6 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อลักษณะโครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของแป้งลูกเดือย แสดงในภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้โครงสร้างผลึก (crystalline structure) ของแป้งลูกเดือยถูกทำลายเนื่องจากความร้อนและแรงทางกล นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศา



ภาพที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)



เซลเซียส) โครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยที่สภาวะการทดลองนี้ถูกทำลายน้อยที่สุด เนื่องจากจากภาพที่ 4.8 ยังคงเห็นลักษณะโครงสร้างผลึกที่มี X-ray diffraction pattern คล้ายคลึงกับของวัตถุดิบ ซึ่งเมื่อคำนวณปริมาณผลึก พบว่า ปริมาณผลึกของแป้งลูกเดือยที่สภาวะการทดลองนี้มีปริมาณลดลง 3 เท่าเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (ตารางที่ 4.5) เนื่องจากที่สภาวะการทดลองนี้มีค่า DG น้อยที่สุด (48.88%) หรือคือแป้งหรือสตาร์ชถูกเจลาทิไนซ์น้อยที่สุดทำให้ยังคงเหลือส่วนแป้งที่ไม่ถูกเจลาทิไนซ์ ซึ่งยังคงแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชได้ในขณะที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ลักษณะโครงสร้างผลึกถูกทำลายทั้งหมด ดังจะเห็นจากภาพที่ 4.8 ที่แสดงเฉพาะส่วนของอสัณฐาน (amorphous) แม้ว่าที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิระดับกลางและสูงจะยังคงเหลือส่วนของแป้งที่ไม่ถูกเจลาทิไนซ์บางส่วน แต่ส่วนที่ยังคงเหลือนี้ไม่อาจแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกได้ เนื่องจากส่วนที่เหลืออยู่นี้เป็นส่วนของอสัณฐานของสตาร์ช ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Chang, Bustos และ Lara (1998) ที่รายงานว่า ความกว้างของหัว die (slit die) อัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ (feed rate) อุณหภูมิบารเรล และความเร็วของสกรูจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีผลทำให้โครงสร้างผลึกของเอกซ์ทรูเดตจาก

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลึกของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Extrusion conditions		Relative crystallinity (%)
Feed moisture content(%)-Barrel temperature profile		
	Native flour	13.17±1.18 <sup>a</sup>
	20-MT	nd
	20-HT	nd
	35-LT	4.92±0.31 <sup>b</sup>
	35-MT	nd
	35-HT	nd
	50-LT	nd
	50-MT	nd
	50-HT	nd

**หมายเหตุ** LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature nd = not detected

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

สตาร์ชข้าวโพดถูกทำลาย ซึ่งความเร็วของสกรูมีผลในการทำลายโครงสร้างสตาร์ชมากที่สุด งานวิจัยของ Charbonniere, Duprat และ Guilbot (1973) เกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตจากสตาร์ชต่าง ๆ พบว่า สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวถูกทำลายทั้งหมด แต่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันสำปะหลังและสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวถูกทำลายเพียงบางส่วน งานวิจัยของ Kadam และ Pepperman (2002) ซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชจากเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว พบว่า รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ของสตาร์ชจากเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวถูกทำลายทั้งหมดหลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 20% อุณหภูมิของบารเลมากกว่า 110 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นของวัตถุดิบเดียวกันนี้ แต่อุณหภูมิของบารเลอยู่ในช่วง 70-90 องศาเซลเซียส จะยังคงสามารถเห็นรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ของสตาร์ชจากเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว

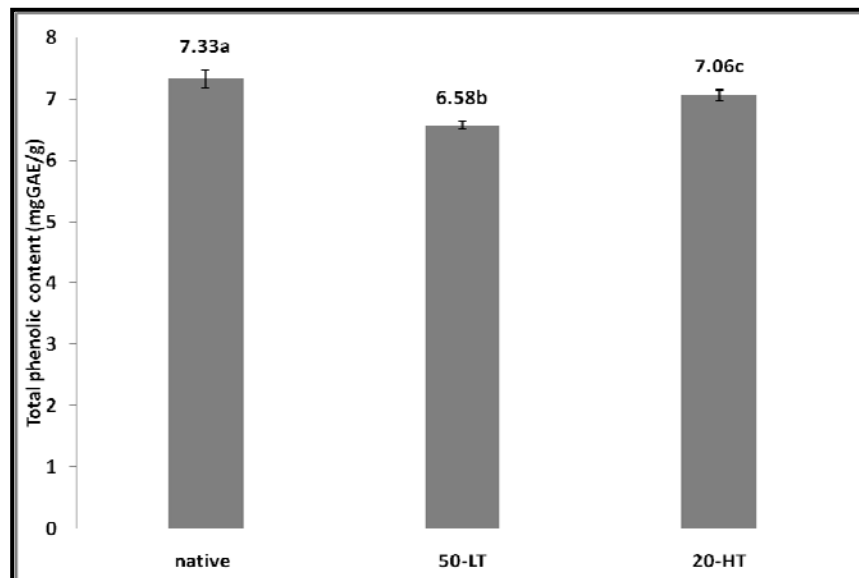
#### 4.4.1.7 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อ antioxidant properties

การวิเคราะห์ antioxidant properties ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันทำการเลือกสภาวะการทดลองของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือย ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่ 2 สภาวะการทดลองนี้เป็นสภาวะการทดลองที่ทำให้ระดับความรุนแรงกับแป้งลูกเดือยที่ระดับสูงสุดและต่ำสุด

##### 1) ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content) ของ methanolic extracts ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ 2 สภาวะการทดลองนี้ พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ 2 สภาวะการทดลองมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่ามากกว่าที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในแป้งลูกเดือยที่ผ่าน และไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยนี้อาจ

เกิดเนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่เป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเฉือน และแรงกล ในการแปรรูปแต่ใช้ระยะเวลาในการแปรรูปที่สั้น ซึ่งระยะเวลาการแปรรูปที่สั้นนี้จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่อยู่ในแป้งลูกเดือยเพียงเล็กน้อย โดยผลที่ได้ไม่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sensoy, Rosen, Ho และ Karwe (2006) ที่รายงานว่า กระบวนการ เอกซ์ทรูชันของแป้ง buckwheat ที่อุณหภูมิหัว die ที่ 170 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดใน เอกซ์ทรูคตจากแป้งลูกเดือยที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) และที่ ความชื้น 50% อุณหภูมิบาเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) อาจเกิดเนื่องจากปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกในเอกซ์ทรูคตที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ถูกทำลายด้วย



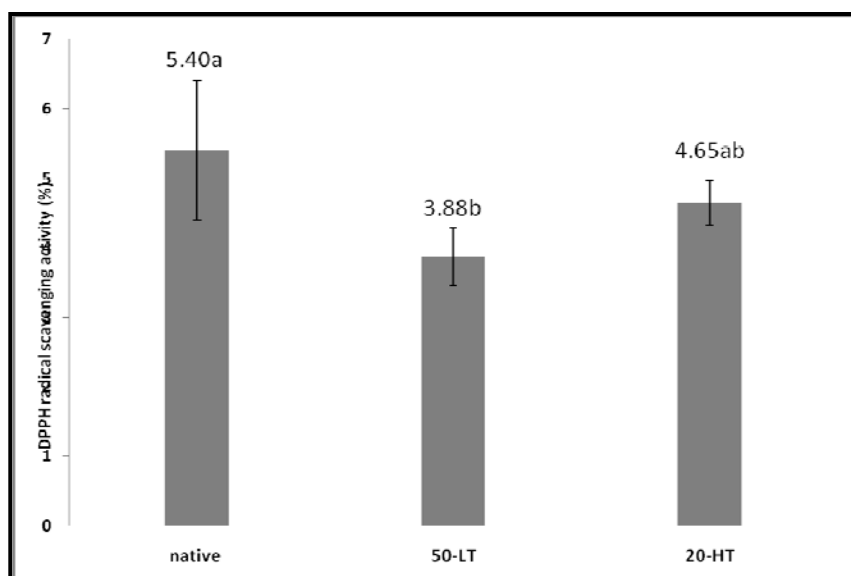
ภาพที่ 4.9 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดือยและเอกซ์ทรูคตจากแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบาเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) (LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ความร้อนที่ทำให้ในระหว่างการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เช่นเดียวกับเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) แต่ก็มีสารประกอบฟีนอลิกบางส่วนที่เกิดเพิ่มขึ้นมาในระหว่างการแปรรูป โดยที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เป็นสภาวะการทดลองที่มีความรุนแรงที่สูงกว่าที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เป็นผลให้ในระหว่างการแปรรูปของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เกิดสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเกิดเนื่องจากการตัดพันธะของสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในรูป conjugated กับสารประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำตาล โพลีแซคคาไรด์ เอมีน (amine) สารประกอบแอลกอฮอล์สายยาว (long-chain alcohol) กรดไขมัน หรือกรดไขมันสายยาว (long chain fatty acid) เป็นต้น (Naczka และ Shadihi, 2006) ส่งผลให้เกิดสารประกอบฟีนอลิกในรูปอิสระ (free phenolic acid) ที่มากกว่าเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) จึงเป็นเหตุให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส)

## 2) ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อ DPPH radical scavenging activity

ภาพที่ 4.10 แสดง DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) พบว่า DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) กับแป้งลูกเดือยไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่ DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) กับแป้งลูกเดือยไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีค่าแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบ DPPH radical scavenging activity ของเอกซ์ทรูเดตจาก 2 สภาวะการทดลองนี้ พบว่า DPPH radical scavenging activity ของเอกซ์ทรูเดตจาก 2 สภาวะการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sensoy และคณะ (2006) ที่รายงานว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้ง buckwheat ที่อุณหภูมิหัว die ที่ 170 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า DPPH radical scavenging activity ผลที่เกิดขึ้นของ DPPH radical scavenging activity ของลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ไม่แตกต่างจากแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเฉือนและแรงกลในการแปรรูป

ที่ใช้ระยะเวลาสั้น ถึงแม้เป็นวิธีการแปรรูปด้วยความร้อนที่ค่อนข้างรุนแรงแต่ด้วยระยะเวลาในการแปรรูปที่สั้นจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity ที่อยู่ในแป้งลูกเดี๋ยหรือมีผลเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้จากข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า DPPH radical scavenging activity ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ดังที่งานวิจัยของ Butsat และคณะ (2009) ที่รายงานว่า ความแตกต่างของ DPPH radical scavenging activity ในแต่ละส่วน (รำ เปลือก ข้าวกล้องและแป้งข้าว (milled rice)) ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ค่าความแตกต่างของ DPPH radical scavenging activity ในแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและของเอกซ์ทรูเดที่ 2 สภาวะการทดลองนี้เพียงเล็กน้อยแม้ว่าผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าไม่แตกต่างกันนั้น อาจเกิดเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทรูเดทั้ง 2 สภาวะการทดลองที่ต่างกัน แต่การเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity อาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก



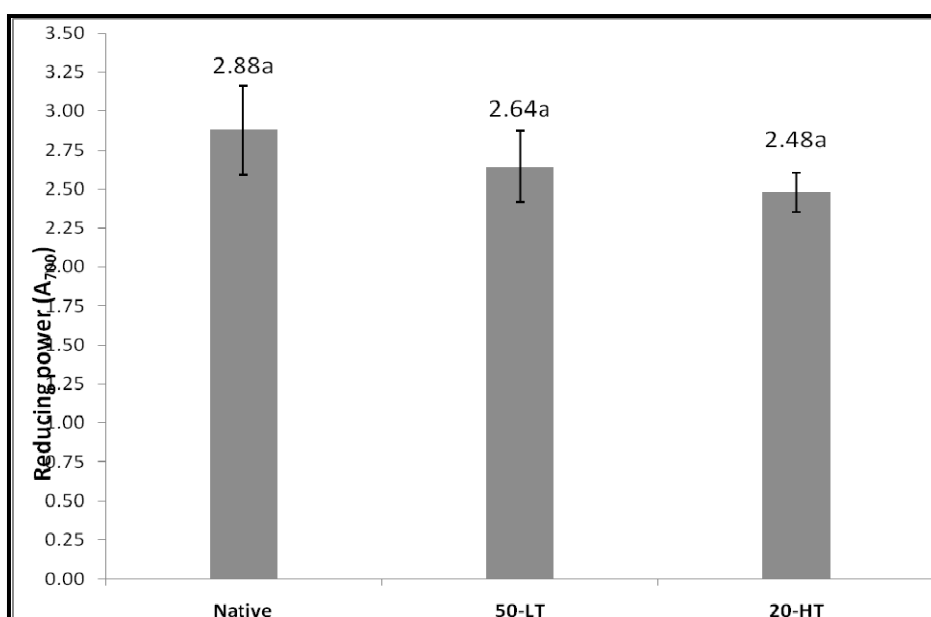
ภาพที่ 4.10 DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทรูเดจากแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) (LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้ไฮโดรเจนอะตอมของสารประกอบฟีนอลิก หรือ สารประกอบประเภทอื่น ๆ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (hydroxyl group) เช่น กรดอะมิโน เป็นต้น กับอนุมูลของ DPPH• ด้วยเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบ DPPH จากสีม่วงเป็นสีเหลือง (บทที่ 3, ภาพที่ 3.6) (Prakash, 2001; Sensoy และคณะ, 2006) แต่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอาจสามารถที่จะนำมาบอกถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity ได้เช่นกัน เช่น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของเอกซ์ทราคต์ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 20% อุณหภูมิ바เรระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 50% อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ซึ่ง DPPH radical scavenging activity ของเอกซ์ทราคต์ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 20% อุณหภูมิ바เรระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 50% อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เช่นกัน

### 3) ผลของกระบวนการเอกซ์ทราคชันต่อ reducing power

ภาพที่ 4.11 แสดง reducing power ของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดือยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันสภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิ바เรระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ที่ความเข้มข้นของตัวอย่างต่อสารละลายเมทานอลที่ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่า reducing power ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) และเมื่อเปรียบเทียบ reducing power ของเอกซ์ทราคต์จาก 2 สภาวะการทดลองนี้พบว่า reducing power ของเอกซ์ทราคต์จาก 2 สภาวะการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่ง reducing power ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันที่ไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องจาก กระบวนการเอกซ์ทราคชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเฉือนและแรงกลในการแปรรูปที่ระยะเวลาสั้น จึงทำให้สารประกอบในบางประเภทที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนกับสารประกอบ ferric-ferricyanide complex ยังคงอยู่ โดยการวิเคราะห์ reducing power เป็นวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ ferric-ferricyanide complex ไปเป็นรูป ferrous-ferricyanide complex ซึ่งขึ้นกับสารต้านอนุมูลอิสระ โดยงานวิจัยของ Choi และคณะ (2006) ได้รายงานไว้ว่า reducing power มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกที่มีในตัวอย่างมีผลต่อการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและอะตอมไฮโดรเจนเพื่อการเปลี่ยนโครงสร้างของ ferric เป็น ferrous ด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของ reducing power ก็ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีในตัวอย่างนั้น ๆ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หา antioxidant properties ด้วยวิธีการ DPPH assay เพราะฉะนั้นการลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของเอกซ์ทราคต์ทั้ง 2 สภาวะการทดลอง

น่าจะให้ reducing power ของเอกซ์ทราคต์มีค่าลดลงด้วยแต่ผลที่ได้พบว่า reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์มีค่าไม่แตกต่างกัน รวมทั้งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของเอกซ์ทราคต์ทั้ง 2 สถานะการทดลองให้ผลที่แตกต่างกับผลของ reducing power ในเอกซ์ทราคต์ แสดงให้เห็นว่า reducing power ที่วัดได้จากแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกเพียงอย่างเดียว แต่มีผลขึ้นกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนอิเล็คตรอน และไฮโดรเจนอะตอมของสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ในตัวอย่างนั้นๆ (Sensoy และคณะ, 2006)



**ภาพที่ 4.11** reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์จากแป้งลูกเดี๋ย หลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทราคชันที่สถานะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบาเรลดัปดาห์ต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลดัปดาห์สูง (150 องศาเซลเซียส) (LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature)  
ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 4) ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณ coixenolide

ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปและที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้ปริมาณ coixenolide มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ coixenolide ของเอกซ์ทรูเดแป้งลูกเดี๋ยยที่ 2 สภาวะการทดลองนี้ พบว่า ปริมาณ coixenolide ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ซึ่งการที่ปริมาณ coixenolide ในแป้งลูกเดี๋ยยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นอาจเป็นผลเนื่องจาก กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเหวี่ยงและแรงกลส่งผลให้สาร coixenolide สามารถหลุดออกจากโครงสร้างของไขมันสายยาวได้ โดยสาร coixenolide เป็นสารที่ละลายอยู่ในส่วนของไขมันในโครงสร้างของเมล็ด ซึ่งการหลุดออกของสาร coixenolide จากโครงสร้างไขมันอาจเหมือนกับการหลุดออกจากโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกบางประเภทเช่น กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) เป็นต้น โดยการหลุดออกจากโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก เกิดจากการที่พันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น โพลีแซคคาไรด์ เอมีน เป็นต้น ถูกทำลายด้วยการแปรรูปด้วยความร้อน (Naczka และ Shadihi, 2006) ซึ่งการหลุดออกจากโครงสร้างของกรดเฟอร์ูลิกนั้นเช่นในงานวิจัยของ Zielinski, Kozłowska และ Lewczuk (2001) ที่ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ

**ตารางที่ 4.6** ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยยและเอกซ์ทรูเดจากแป้งลูกเดี๋ยย หลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส)

Extrusion conditions		Coixenolide content (ug/g)
Feed moisture content (%)-Barrel temperature profile		
Native flour		18.15 ± 0.02
20-HT		61.23 ± 0.00
50-LT		2727.04 ± 1.65

**หมายเหตุ** LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature



bioactive ในเมล็ดก่อนและหลังการให้ความร้อน ซึ่งได้รายงานว่า ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวไรย์และข้าวโอ๊ตหลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิ 120, 160 และ 200 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ปริมาณกรดฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในรูปแบบสารประกอบฟีนอลิกอิสระ และ ester bound phenolic acid

#### 4.4.2 กระบวนการออโตเคลป (autoclave process)

##### 4.4.2.1 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน

ค่า DG ของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า ค่า DG ของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปอยู่ในช่วง 88-98% โดยค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแปรรูป ซึ่งค่า DG ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากความชื้นของวัตถุดิบที่ทำการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปจัดอยู่ในช่วงระดับสูง ซึ่งพบว่า ที่ความชื้นของวัตถุดิบในช่วงนี้มีค่า  $T_m$  ของสตาร์ชที่ต่ำกว่าช่วงความชื้นของวัตถุดิบช่วงระดับต่ำถึงกลาง ส่งผลทำให้สตาร์ชถูกเจลลิตีในซีได้ในปริมาณที่มากขึ้น (Roos, 1995) ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของค่า DG เกิดเนื่องจากค่า  $T_m$  ของสตาร์ชที่ต่ำลงมารวมถึงช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าสูงกว่าค่า  $T_c$  ของแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวด้วยจึงส่งผลทำให้สตาร์ชเกิดการเจลลิตีในซีได้ในปริมาณสูง นอกจากนี้การที่ค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่มากขึ้น เนื่องจากที่ระยะเวลาในการออโตเคลปเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนภายในระบบมีปริมาณสะสมที่มากขึ้น และช่วงอุณหภูมิที่ใช้ใน

ตารางที่ 4.7 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน

Time of autoclave (min)	Degree of gelatinization (%)
15	88.24±0.29 <sup>c</sup>
30	92.43±0.43 <sup>b</sup>
45	94.71±1.50 <sup>ab</sup>
60	97.45±1.27 <sup>a</sup>

**หมายเหตุ** ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

การทดลองมีค่าสูงกว่า  $T_c$  ของแป้งลูกเดี๋ยยพันธุ์ขาวจึงส่งผลทำให้สตาร์ชถูกการเจลาทิไนซ์ได้ในปริมาณมากที่มากขึ้นตามปริมาณความร้อนที่สะสมภายในระบบ เป็นเหตุให้ค่า DG ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแปรรูป

#### 4.4.2.2 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์

ผลของการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า แป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีปริมาณ RS ไม่แตกต่างกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ในขณะที่ปริมาณ RDS ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) แต่ปริมาณ SDS ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RDS ในแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป เกิดเนื่องจาก การแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปเป็นการแปรรูปโดยอาศัยความร้อนซึ่งเกิดจากไอน้ำในสภาวะปิดส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ช หรือองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น โปรตีน ไชมัน เป็นต้น ถูกทำลาย ซึ่งโครงสร้างขององค์ประกอบเหล่านี้ที่ถูกทำลายไปส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างเพื่อต้านทานการย่อยของเอนไซม์มีปริมาณน้อยลง จึงทำให้ในช่วงแรกของการย่อยด้วยเอนไซม์ผสม

ตารางที่ 4.8 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์

Time of autoclave (min)	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)
Native flour	13.99±0.25 <sup>c</sup>	45.07±1.74 <sup>a</sup>	40.98±1.02 <sup>a</sup>
15	28.79±0.87 <sup>a</sup>	32.01±0.02 <sup>b</sup>	39.20±0.88 <sup>b</sup>
30	28.39±0.86 <sup>a</sup>	31.85±1.56 <sup>b</sup>	39.76±0.69 <sup>ab</sup>
45	27.13±0.62 <sup>ab</sup>	33.29±0.69 <sup>b</sup>	39.58±0.08 <sup>ab</sup>
60	25.90±0.82 <sup>b</sup>	33.20±0.23 <sup>b</sup>	40.89±0.59 <sup>a</sup>

**หมายเหตุ** RDS= rapidly digestible starch SDS= slowly digestible starch และ RS= resistant starch ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ระหว่าง pancrease และ amyloglucosidase สามารถย่อยได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ปริมาณ RDS เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อน (Hagenimana และคณะ, 2006) นอกจากนี้ การที่ปริมาณ RS ของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูปนั้น อาจเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชที่มีโอกาสเกิดได้น้อย ซึ่งผลการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ย พบว่า ต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยนานถึง 39 วัน จึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณ RS type 3 ซึ่งเป็น RS ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชของลูกเดี๋ยมีปริมาณน้อยด้วย ทำให้ปริมาณ RS ของแป้งลูกเดี๋ยโดยรวมนั้นมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป

จากผลการทดลองที่ได้ของปริมาณ RDS และ SDS ในแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ยูรี วันดี, จูร์ริตัน พุดตาลเล็ก, วิไล รังสาทอง และ ดุษฎี อุตภาพ (2552) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของสภาวะในการเจลาทีนซ์ต่อการเกิด RS ในแป้งพุทธรักษา รายงานไว้ว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่เวลา 30 และ 120 นาที ปริมาณ RDS ในแป้งพุทธรักษามีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ SDS และ RS มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการแปรรูป นอกจากนี้ งานวิจัยของ Alonso, Calixto, และ Delcour (1998) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของแหล่งของแป้งและกระบวนการแปรรูปต่อการสร้าง RS type 3 รายงานว่า ปริมาณ RS type 3 จากสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าว สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพด มีปริมาณลดลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และงานวิจัยของ Niba และ Hoffman (2003) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS และปริมาณเบต้า-กลูแคน ( $\beta$ -glucan) ของเมล็ดข้าวฟ่าง (sorghum) หลังผ่านการแช่และกระบวนการออโตเคลป ได้รายงานว่ ปริมาณ RS ของเมล็ดข้าวฟ่างหลังผ่านการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 120 และ 130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีมีค่าลดลงเมื่อเทียบเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ซึ่งจากงานวิจัยของ Alonso และคณะ (1998) และ Niba และคณะ (2003) นี้ไม่สอดคล้องกับการทดลองที่ได้ของปริมาณ RS ในแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณ RS ของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณ RS ในงานวิจัยของ Alonso และคณะ (1998) และ Niba และคณะ (2003) มีค่าลดลง จึงเห็นได้ว่าปริมาณ RS ขึ้นกับชนิดของแป้งหรือสตาร์ชที่นำมาแปรรูป

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการออโตเคลปต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่า ภาพรวมที่ระยะเวลาในการออโตเคลปปริมาณ RDS SDS และ RS ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) แต่มีค่าบางค่าที่แตกต่างกันทางสถิติ โดยระยะเวลาในการออโตเคลปที่ 15 และ 30 นาที

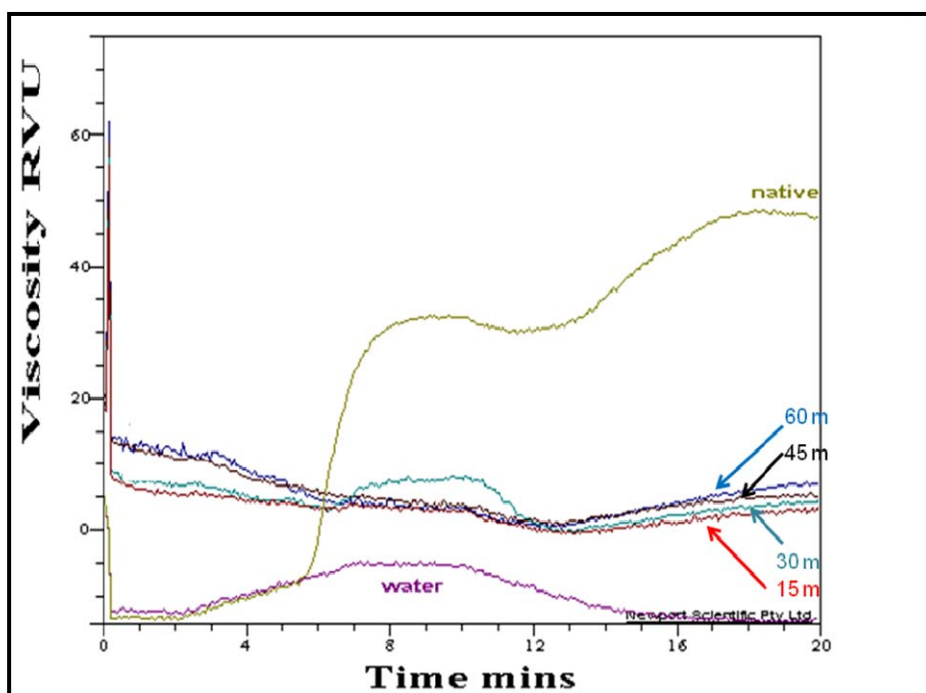
ให้ปริมาณ RDS ที่แตกต่างกันทางสถิติกับที่ระยะในการออโตเคลปที่ 60 นาที ( $p < 0.05$ ) และที่ระยะเวลาในการออโตเคลปที่ 15 นาที ให้ปริมาณ RS ที่แตกต่างกันทางสถิติกับที่ระยะในการออโตเคลปที่ 60 นาที ( $p < 0.05$ ) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องในเรื่องของปริมาณ SDS กับงานวิจัยของ ยูรี วันดี และคณะ (2552) ที่ได้อธิบายไว้ข้างบนได้รายงานเพิ่มเติมว่า ระยะเวลาในการออโตเคลปไม่มีผลต่อปริมาณแป้งชนิดต่าง ๆ ตามชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ ความแตกต่างของปริมาณ RDS และ RS ที่ระยะเวลาในการออโตเคลปที่ 15 และ 60 นาที อาจเนื่องมาจากที่ระยะเวลาในการออโตเคลปที่นานส่งผลให้โมเลกุลของสตาร์ชหรือโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินแตกตัวกลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ๆ และโมเลกุลเหล่านี้สามารถที่จับกันเพื่อเกิดโครงสร้างของสตาร์ชใหม่ที่สามารถทนต่อการย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มากกว่าที่ระยะเวลาในการออโตเคลปที่ 15 นาที (Englyst และคณะ, 1992)

นอกจากนี้ การที่ปริมาณ RDS SDS และ RS ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านการแปรรูปนั้น เนื่องจากแป้งลูกเดี๋ยยที่นำมาใช้ในการแปรรูปมีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ มากมาย เช่น โปรตีน ไขมัน โดยองค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนในการจัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยสตาร์ช ซึ่งจากการศึกษาทางด้านโครงสร้างของลูกเดี๋ยยทำให้ทราบว่า เม็ดสตาร์ชของลูกเดี๋ยยถูกห่อหุ้มล้อมด้วยโปรตีนทั้งในรูปแบบที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชหรือที่อยู่อิสระ ดังนั้นโอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองจึงมีโอกาสการเข้าไปย่อยได้น้อย แม้ว่าการแปรรูปมีส่วนช่วยทำให้แป้งเกิดเจลาทิไนซ์และเดกซ์ทริไนซ์ก็ตาม นอกจากนี้ การให้ความร้อนในการแปรรูปอาจมีส่วนช่วยส่งเสริมการจับกันระหว่างสตาร์ชและโปรตีน ซึ่งสารประกอบนี้มีผลให้โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองมีโอกาสเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DG กับปริมาณ RDS SDS และ RS พบว่า ค่า DG ไม่มีสหสัมพันธ์กับปริมาณ RDS SDS และ RS ( $p > 0.05$ ) (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 8ง) หรือคือ ค่า DG ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นกับปริมาณ RDS SDS และ RS ซึ่งในการทดลองนี้ ค่า DG ที่ระดับต่าง ๆ จากสภาวะการทดลองที่เวลาต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS SDS และ RS เช่นเดียวกับการแปรรูปแป้งลูกเดี๋ยยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ได้อธิบายไว้ข้างบน (Lai และคณะ, 2000; Englyst และคณะ, 1992; Holm และคณะ, 1983; Hoover และ Sosulski, 1985; Ring และคณะ, 1987)

#### 4.4.2.3 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อคุณสมบัติการเกิดเพสต์

ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อคุณสมบัติการเกิดเพสต์ จากการวิเคราะห์ด้วย RVA แสดงในภาพที่ 4.12 พบว่า โปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปทุกสภาวะการทดลองมีค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งเมื่อ

เปรียบเทียบโปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยย ที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า โปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลาต่าง ๆ ไม่สามารถเห็นลักษณะของพีกความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (CPV) และลักษณะโปรไฟล์ความหนืดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง ซึ่งแตกต่างกับโปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป นอกจากนี้ โปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีค่าสูงกว่าโปรไฟล์ความหนืดของน้ำ แสดงให้เห็นว่า แป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปยังคงสามารถให้ลักษณะความหนืดกับระบบได้ การลดลงของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ในแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu, Corke และ Ramsden (2000) ที่ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการออโตเคลปต่อการตัดแปรทางเคมีด้วยการแทนที่ด้วยหมู่อะซิติก (acetylation) ในสตาร์ชข้าวโพด รายงานว่า โปรไฟล์ความหนืดของสตาร์ชข้าวโพดมีค่าลดลงหลังจากการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 51 นาที โดยเฉพาะในสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสสูง 2 พันธุ์ คือ Hi-maize (อะไมโลส 66%) และ Gelose 50



ภาพที่ 4.12 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ระยะเวลาต่าง ๆ (15m = เวลาในการออโตเคลป 15 นาที 30m = เวลาในการออโตเคลป 30 นาที 45m = เวลาในการออโตเคลป 45 นาที และ 60m = เวลาในการออโตเคลป 60 นาที)

(อะไมโลส 47%) ที่ให้โปรไฟล์ความหนืดคล้ายคลึงกับโปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป การลดลงของโปรไฟล์ความหนืดหลังผ่านการแปรรูปเนื่องจาก ความชื้นของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป เป็นช่วงระดับสูงซึ่งมีผลทำให้ค่า  $T_m$  ของสตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) ทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีปริมาณที่มากกว่าแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ในเทอมของค่า DG พบว่า แป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่า DG สูง โดยสัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์ที่มีปริมาณสูง มีผลทำให้แป้งสามารถดูดซับน้ำและเกิดเจลที่ให้ความหนืดได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำที่สูง เป็นเหตุให้ความหนืดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงของการวิเคราะห์ที่เวลา 0-1 นาทีแต่หลังจากนั้นแล้วแป้งที่เจลาทิไนซ์ในส่วนนี้จะไม่สามารถทนต่อแรงเฉือนจากการกวนตลอดเวลาจากเครื่อง RVA ทำให้แป้งที่เจลาทิไนซ์แล้วเกิดการแตกตัวของโมเลกุลแป้งหรือสตาร์ช หรือกล่าวคือความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดแป้งหรือสตาร์ชมีความแข็งแรงน้อยลง ส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลง (Gutkoski และคณะ, 1999; Hagenimana และคณะ, 2006) นอกจากนี้ การที่โปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่ระยะเวลาต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน เนื่องจาก ค่า DG ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อยด้วย และจากการวิเคราะห์ความหนืดด้วย RVA เป็นการวิเคราะห์ทางเคมีกายภาพในระดับ Macromolecule จึงเป็นเหตุให้โปรไฟล์ความหนืดของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่ระยะเวลาต่าง ๆ ไม่สามารถเห็นความแตกต่างกันได้

#### 4.4.2.4 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

ค่า WAI และค่า WSI ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบค่า WAI ระหว่างแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป พบว่า ค่า WAI ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป มีค่าสูงกว่าแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ekanayake, Nair, Asp และ Jansz (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการแปรรูปของถั่วพินธุ์ sword (sword beans; *Canavalia gladiata*) ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ช ได้รายงานไว้ว่า ค่า WAI ของสตาร์ชถั่วมีค่าสูงขึ้นหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาทีเมื่อเทียบกับสตาร์ชถั่วที่ไม่ผ่านการแปรรูป และงานวิจัยของ Chang และคณะ (1998) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของลูกเดี๋ย รายงานว่า ค่า WAI ของเมล็ดลูกเดี๋ยที่กระเทาะเปลือก

ออกแล้ว (dehulled kernel) มีค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบค่า WAI ระหว่างแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ค่า WAI ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่เวลาต่าง ๆ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) การเพิ่มขึ้นของค่า WAI ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป เนื่องจากความชื้นของวัตถุดิบที่เลือกนำมาใช้อุณหภูมิในช่วงระดับสูงทำให้ค่า  $T_m$  ของสตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) ส่งผลให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีค่ามากกว่าแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่า DG โดยค่า DG ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าค่อนข้างสูง ทำให้แป้งที่เจลาทิไนซ์แล้วสามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้มากขึ้น มีผลให้ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ที่ระยะเวลาการออโตเคลปไม่มีผลต่อค่า WAI ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูป อาจเนื่องจากค่า DG ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีค่าใกล้เคียงกันมีผลให้ค่า WAI ที่ได้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งทำให้การวิเคราะห์ทางสถิติไม่สามารถวิเคราะห์หาความแตกต่างกันได้

ค่า WSI ของแป้งลูกเดือยมีค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยการเพิ่มขึ้นของค่า WSI หลังผ่านการแปรรูป เนื่องจากความร้อนที่ทำให้จากการแปรรูปมีผลให้สตาร์ชหรือแป้งลูกเจลาทิไนซ์ โปรตีนทั้งในรูปอิสระและรูปที่เกาะบนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชเกิดการสูญเสียสภาพ (denature) เป็นผลให้โมเลกุลของสตาร์ชบางส่วนเกิดการหลุดออกจากโครงสร้างของเม็ดแป้ง และโปรตีนเกิดการเปิดตัวออก (unfold) ซึ่งโปรตีนที่เปิดตัวออกนี้

ตารางที่ 4.9 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

Time of autoclave (min)	WAI (g/g)	WSI (%)
Native flour	2.27±0.04 <sup>b</sup>	9.08±0.12 <sup>d</sup>
15	6.04±0.16 <sup>a</sup>	42.68±1.30 <sup>c</sup>
30	6.17±0.10 <sup>a</sup>	45.86±1.02 <sup>b</sup>
45	5.87±0.38 <sup>a</sup>	46.32±1.15 <sup>b</sup>
60	5.84±0.10 <sup>a</sup>	48.80±0.65 <sup>a</sup>

**หมายเหตุ** WAI = water absorption index และ WSI = water solubility index

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

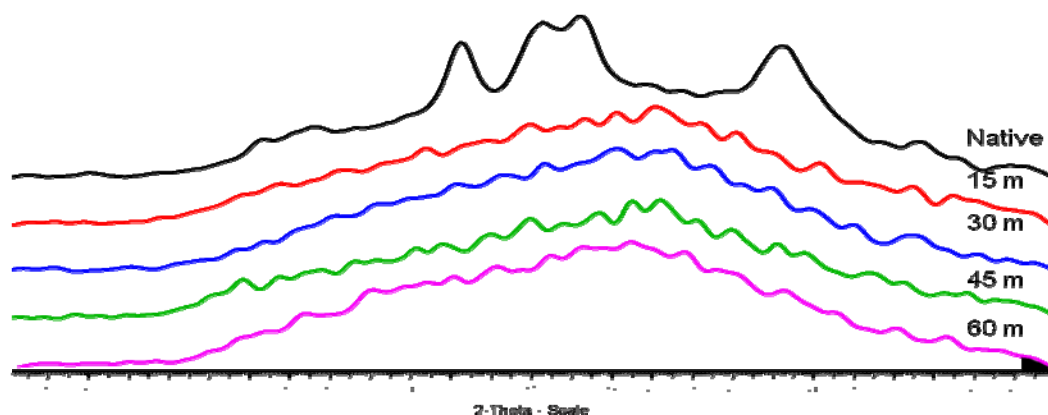
สามารถที่จะจับกับโมเลกุลของน้ำได้จาก 2 เหตุผลนี้เป็นผลให้ปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้น หรือคือมีค่า WSI เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ekanayake และคณะ (2006) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการแปรรูปของถั่วพันธุ์ sword ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ช ได้รายงานไว้ว่า ค่า WSI ของสตาร์ชถั่วมีค่าสูงขึ้นหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาทีเมื่อเทียบกับสตาร์ชถั่วที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ผลของค่า WSI ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปให้ผลในทางตรงข้ามกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (1998) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของลูกเดือย ได้รายงานไว้ว่า ค่า WSI ของเมล็ดลูกเดือยที่กระเทาะเปลือกออกแล้วมีค่าลดลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบค่า WSI ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลาการแปรรูปที่เวลาต่าง ๆ พบว่า การแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลา 60 นาทีให้ค่า WSI สูงที่สุด ในขณะที่การแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลา 15 นาทีให้ค่า WSI ต่ำที่สุด ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าค่า WSI ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปขึ้นกับระยะเวลาในการออโตเคลป หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ค่า WSI ขึ้นกับค่า DG ด้วย ซึ่งจากการหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า DG กับค่า WSI พบว่า ค่า DG มีสหสัมพันธ์กับค่า WSI ( $p < 0.05$ ) (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 8ง) แสดงให้เห็นว่าค่า DG มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นกับค่า WSI คือ เมื่อค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ ค่า WSI มีความสัมพันธ์กับระดับการแตกของโมเลกุลด้วย (Bryant และคณะ, 2001) ซึ่งค่า WSI ขึ้นกับปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ เช่น โปรตีน โมเลกุลสตาร์ชบางส่วนที่เกิดจากการทำลายด้วยความร้อน แร่ธาตุ เป็นต้น (Guba และคณะ, 1997) ดังนั้น เมื่อระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของแป้งที่เจลลิตีในซีมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแป้งที่เจลลิตีในซีแล้วมีความแข็งแรงของโครงสร้างของเม็ดแป้งลดลง และสามารถที่จะดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้มากกว่าแป้งที่ไม่เจลลิตีในซี จึงเป็นเหตุให้บางส่วนของแป้งที่เจลลิตีในซีแล้วเกิดการแตกหรือหลุดออกจากโครงสร้างของเม็ดแป้งได้ เช่น อะไมโลส หรือ อะไมโลเพคตินสายสั้น เป็นเหตุให้ปริมาณของของแข็งที่สามารถละลายได้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือคือมีค่า WSI เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มขึ้นเป็นผลให้สัดส่วนของแป้งที่เจลลิตีในซีมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นเหตุให้ค่า WSI เพิ่มขึ้นด้วย

#### 4.4.2.5 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

ผลของกระบวนการออโตเคลปที่ระยะเวลาต่าง ๆ ต่อลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยจากการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงในภาพที่ 4.13 พบว่า กระบวนการออโตเคลปมีผลให้



ลักษณะโครงสร้างผลึกถูกทำลาย เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (1998) ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของลูกเดี๋ยย รายงานว่า ลักษณะโครงสร้างผลึกของเมล็ดลูกเดี๋ยยที่กระเทาะเปลือกออกแล้วหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีถูกทำลายโครงสร้างผลึกเช่นกัน โครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่ถูกทำลายเนื่องจากผลของความร้อนจากการออโตเคลปและความชื้นของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการออโตเคลปเป็นช่วงระดับสูง ซึ่งมีผลทำให้ค่า  $T_m$  ของสตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) ทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีปริมาณที่มากกว่าแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ โดยสามารถอธิบายได้ในเทอมของค่า DG พบว่าค่า DG แป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ได้มีค่าค่อนข้างสูง นอกจากนี้ จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ซึ่งเป็นการแปรรูปด้วยความร้อนส่งผลให้เกิดการทำลายลักษณะโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกับการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ในการทดลองข้างต้น



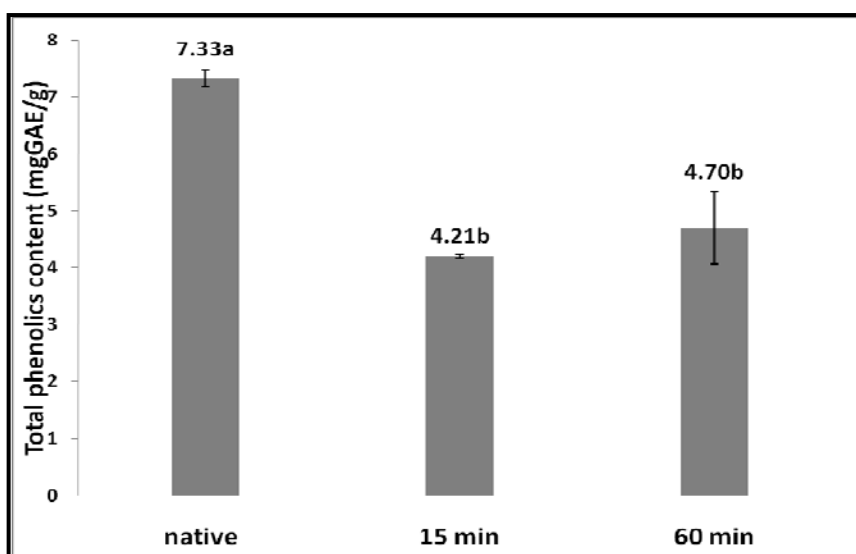
ภาพที่ 4.13 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป (15m = เวลาในการออโตเคลป 15 นาที 30m = เวลาในการออโตเคลป 30 นาที 45m = เวลาในการออโตเคลป 45 นาที และ 60m = เวลาในการออโตเคลป 60 นาที)

#### 4.4.2.6 ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อ antioxidant properties

การวิเคราะห์ antioxidant properties ของแป้งลูกเดี๋ยยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปทำการเลือกสภาวะการทดลองของผลิตภัณฑ์จากแป้งลูกเดี๋ยย ที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการออโตเคลปที่ 15 และ 60 นาที เนื่องจากที่ 2 สภาวะการทดลองนี้เป็นสภาวะการทดลองที่ให้ระยะเวลาที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุด

### 1) ผลของกระบวนการอโตะเคลปต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาทีและแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แสดงในภาพที่ 4.14 พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดี๋ยยหลังผ่านการแปรรูปอโตะเคลปมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลป เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extract จากแป้งลูกเดี๋ยยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่ระยะเวลา 15 และ 60 นาที พบว่า เวลาในการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปทั้ง 2 สถานะการทดลองมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ



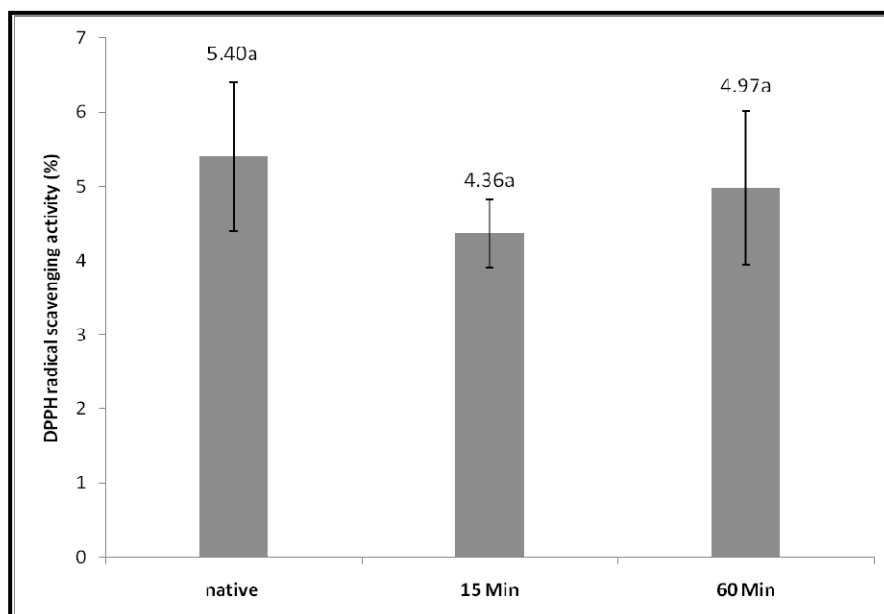
ภาพที่ 4.14 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts จากแป้งลูกเดี๋ยยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

งานวิจัยของ Zhang, Chen, Li, Pei และ Liang (2010) ที่ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อ antioxidant properties ของ tartary buckwheat ได้รายงานว่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ tartary buckwheat มีค่าลดลง หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่ระดับความดัน 0.1 และ 0.2 MPa และระยะเวลา 20 และ 40 นาที โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ tartary buckwheat หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลป ที่ระดับความดัน 0.2

MPa และระยะเวลา 20 และ 40 นาทีที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) การลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกถูกทำลายโครงสร้างด้วยความร้อนจากการแปรรูป (Zhang และคณะ, 2010) นอกจากนี้ การลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตเคลป ที่มีค่ามากกว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน อาจเนื่องจากกระบวนการอโตเคลปเป็นกระบวนการที่ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนในระหว่างการแปรรูปนานกว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่สะสมภายในผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตเคลป มีปริมาณมากกว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นเหตุให้สารประกอบฟีนอลิกในแป้งลูกเดี๋ยถูกทำลาย โดยกระบวนการอโตเคลปได้มากกว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ใช้ระยะเวลาในการแปรรูปที่สั้น ในขณะเดียวกัน การให้ความร้อนไม่ใช่เพียงมีผลในการทำลายโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกเพียงอย่างเดียว แต่ในบางครั้งการให้ความร้อนจากการแปรรูปที่อุณหภูมิที่สูงยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกได้เช่นกัน เช่น การให้ความร้อนด้วยการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 60 นาทีหรือการอบที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีในเมล็ดข้าวบาร์เลย์ส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสารประกอบฟีนอลิกของเมล็ดข้าวบาร์เลย์หลังผ่านการให้ความร้อนเกิดเนื่องจากความร้อนที่ให้ในระหว่างการแปรรูป มีผลทำให้ส่วนประกอบของเซลล์ (cellular constituent) ถูกทำลายส่งผลให้พันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับเซลล์ถูกทำลายลงเป็นเหตุสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในรูปอิสระ ทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่วัดได้ในเมล็ดข้าวบาร์เลย์มีค่าเพิ่มขึ้น (Infante, Guzman, Laredo และ Alonso, 2010) ดังนั้น การให้ความร้อนในระหว่างการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตเคลป จึงมีผลในการทำลายพันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำตาล โพลีแซคคาไรด์ เป็นต้นด้วย จึงเป็นเหตุให้เกิดการปล่อยสารประกอบฟีนอลิกออกมาจากโครงสร้างให้อยู่ในรูปอิสระ และทำให้ปริมาณฟีนอลิกที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น (Naczka และ Shadahi, 2006) ซึ่งจากเหตุผลของความร้อนที่มีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิก เป็นเหตุผลที่ทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่เวลาในการอโตเคลปที่ 60 นาทีมีค่าสูงกว่าที่เวลาในการอโตเคลปที่ 15 นาทีเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่ระยะเวลาการแปรรูปที่นาน ทำให้ปริมาณความร้อนสะสมมีค่าสูงกว่าการแปรรูปที่ใช้ระยะเวลาที่น้อย ซึ่งปริมาณความร้อนที่สะสมในปริมาณที่มากนี้มีผลให้โอกาสการตัดพันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบอื่น ๆ นั้นมีโอกาสที่สูงเช่นกัน เป็นเหตุให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่เวลา 60 นาทีมีค่าสูงกว่าที่เวลา 15 นาที

## 2) ผลของกระบวนการอโตะเคลปต่อ DPPH radical scavenging activity

DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extract ของแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปและแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที แสดงในภาพที่ 4.15 พบว่า DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ซึ่งผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2010) ที่ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อ antioxidant properties ของ tartary buckwheat ที่รายงานว่า DPPH radical scavenging activity ของ tartary buckwheat มีค่าลดลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่ระดับความดัน 0.1 และ 0.2 MPa และระยะเวลา 20 และ 40 นาที นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบ DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที พบว่า DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่ระยะเวลา 15 และ 60 นาทีมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ซึ่ง



ภาพที่ 4.15 DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts จากแป้งลูกเดือยก่อน และหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอโตะเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของ DPPH radical scavenging activity ของ tartary buckwheat หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลป ที่ระดับความดัน 0.2 MPa และระยะเวลา 20 และ 40 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ )

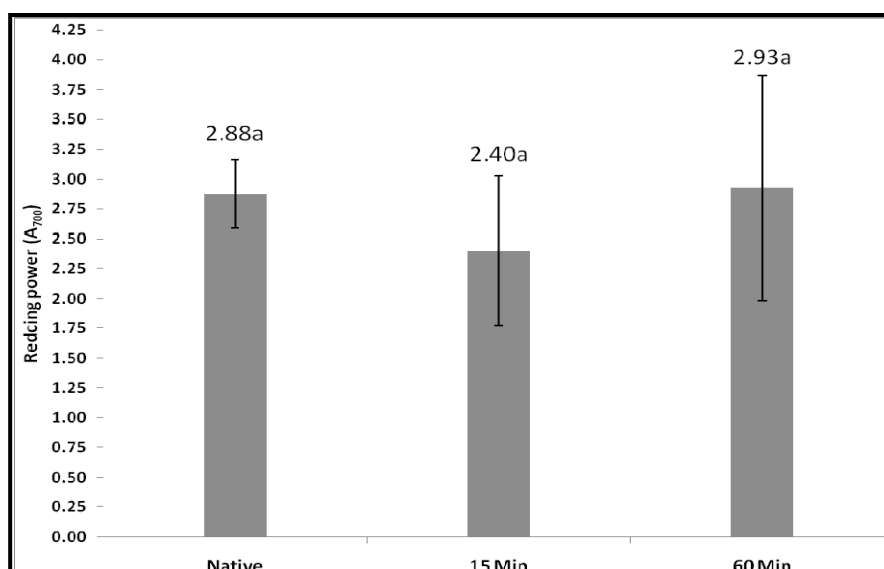
จากข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า DPPH radical scavenging activity ขึ้นกับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก (Sensoy และคณะ, 2006) ดังนั้น การที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งลูกเดี๋ยมีค่าลดลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลป น่าจะมีผลทำให้ DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดี๋ยมีค่าลดลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลปด้วย แต่ผลที่ได้พบว่า DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปมีค่าไม่แตกต่างกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แสดงให้เห็นว่า DPPH radical scavenging activity อาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้ไฮโดรเจนอะตอมของสารประกอบฟีนอลิก หรือสารประกอบประเภทอื่น ๆ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ เช่น กรดอะมิโน เป็นต้น กับอนุมูลของ DPPH• เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบจากสีม่วงเป็นสีเหลือง (บทที่ 3, ภาพที่ 3.6) (Prakash, 2001; Sensoy และคณะ, 2006) แต่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอาจสามารถที่จะนำมาบอกถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity ได้เช่นกัน เช่น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่เวลา 60 นาทีมีค่าสูงกว่าที่เวลา 15 นาที DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปที่เวลา 60 นาทีให้ค่าที่สูงกว่าที่เวลา 15 นาทีเช่นกัน

### 3) ผลของกระบวนการอบโอโตเคลปต่อ reducing power

reducing power ของ methanolic extract ของแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูปและแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที ที่ความเข้มข้นของตัวอย่างต่อสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ที่ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงในภาพที่ 4.16 พบว่า reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลปมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) และ reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลปที่ระยะเวลา 15 และ 60 นาทีมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หา antioxidant activity ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการอบโอโตเคลปด้วยวิธีการ DPPH assay

จากข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบว่า การเปลี่ยนแปลง reducing power มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก (Choi และคณะ, 2006) ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกที่ได้จากตัวอย่างมีผลต่อการให้อิเล็กตรอนและไฮโดรเจนอะตอม เพื่อการเปลี่ยนโครงสร้างของ ferric-

ferricyanide complex ไปเป็นรูป ferrous-ferricyanide complex ดังนั้น การเปลี่ยนแปลง reducing power ก็ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในตัวอย่างนั้น ๆ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หา antioxidant properties ด้วยวิธีการ DPPH assay เช่นเดียวกันการลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป น่าจะมีผลทำให้ reducing power มีค่าลดลงด้วย แต่ผลที่ได้พบว่า reducing power ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปมีค่าไม่แตกต่างกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แสดงให้เห็นว่า reducing power อาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วย DPPH assay แต่มีผลจากความสามารถในการให้อิเล็กตรอนและไฮโดรเจนอะตอมกับสาร ferric-ferricyanide complex ของสารต้านออกซิเดชันในตัวอย่างนั้น ๆ แต่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอาจสามารถที่จะนำมาบอกถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง reducing power ได้เช่นเดียวกับวิธีการ DPPH assay เช่น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปที่เวลา 60 นาทีมีค่าสูงกว่าที่เวลา 15 นาที reducing power ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปที่เวลา 60 นาทีให้ค่าที่สูงกว่าที่เวลา 15 นาทีเช่นกัน



ภาพที่ 4.16 reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากแป้งลูกเดือยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### 4) ผลของกระบวนการออโตเคลปต่อปริมาณ coixenolide

ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปและแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่เวลา 15 และ 60 นาที แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่เวลา 15 นาทีส่งผลให้ปริมาณ coixenolide มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยออโตเคลป ในขณะที่เวลาในการออโตเคลปที่ 60 นาทีส่งผลให้ปริมาณ coixenolide มีค่าลดลง การที่ปริมาณ coixenolide ในแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นผลเนื่องจาก กระบวนการออโตเคลปเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อนจากไอน้ำ และมีปริมาณความชื้นของวัตถุดิบสูงซึ่งความร้อนมีผลให้สาร coixenolide สามารถหลุดหรือแตกออกจากโครงสร้างของไขมันที่เป็นสายยาวได้ โดยสาร coixenolide เป็นสารที่ละลายอยู่ในส่วนของไขมันภายในโครงสร้างของเมล็ด ซึ่งผลที่ได้ของสาร coixenolide ในแป้งลูกเดือยอาจเป็นเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเมล็ดข้าวบาร์เลย์ หลังผ่านการให้ความร้อนด้วยกระบวนการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 60 นาทีหรือกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีในเมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่มีผลให้สารประกอบฟีนอลิกมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสารประกอบฟีนอลิกหลังผ่านการให้ความร้อนเนื่องจาก ความร้อนที่ให้อุณหภูมิระหว่างกระบวนการแปรรูปมีผลทำให้พันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น โพลีแซคคาไรด์ เอมีน เป็นต้น ถูกทำลายจึงมีผลให้เกิดการปลดปล่อยสารประกอบฟีนอลิกออกจากโครงสร้างเดิม (Infante และคณะ, 2010; Naczek และ Shadihi, 2006) นอกจากนี้ การลดลงของสาร coixenolide ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่เวลา 60 นาที อาจเนื่องจาก การแปรรูปที่ให้ความร้อนเป็นระยะเวลาที่นานและมีปริมาณสะสมของความร้อนในปริมาณสูงกว่าที่ระยะเวลาในการออโตเคลปที่ 15 นาทีส่งผลให้โครงสร้างของไขมันถูกทำลายกลายเป็นสายไขมันสายสั้น ซึ่งอาจมีผลในการทำลายโครงสร้างโครงสร้างของสาร coixenolide หรือ

ตารางที่ 4.10 ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดือยก่อน และหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปที่ เวลา 15 และ 60 นาที

Time of autoclave (min)	Coixenolide content (ug/g)
Native flour	18.15 ± 0.02
15	20.80 ± 0.00
60	10.59 ± 0.00

โครงสร้างของสาร 2,3-butanediol บางส่วนด้วยมีผลให้ไม่สามารถวัดค่าสาร 2,3-butanediol ได้ด้วยเครื่อง GC ซึ่งสาร 2,3-butanediol เป็นสารที่อนุமானให้เทียบกับสาร coixenolide จากแป้งลูกเดี๋ย เนื่องจากเป็นสารในกลุ่ม di-glyceride เช่นกันแต่แตกต่างกันที่หมู่ R ของโครงสร้าง

#### 4.4.3 กระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์

ผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเอกซ์ทรูชันและกระบวนการออโตเคลปต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า ปริมาณ RDS SDS และ RS ระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 75% และอุณหภูมิระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) กับกระบวนการออโตเคลปที่เวลา 15 นาทีมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ถึงแม้ว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาที่สั้น ในขณะที่กระบวนการออโตเคลปเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลาที่นานกว่าซึ่งทำให้เกิดการสะสมปริมาณความร้อนในปริมาณที่สูง ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้ให้ระดับการเกิดเจลาทิโนเซชันของสตาร์ชที่แตกต่างกัน แต่ให้ปริมาณ RDS SDS และ RS ไม่แตกต่างกันในระหว่าง 2 กระบวนการ ดังนั้น การที่ปริมาณ RDS SDS และ RS ของแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่แตกต่างกันระหว่างการแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการนี้ เกิดเนื่องจากแป้งลูกเดี๋ยที่นำมาใช้ในการแปรรูปมีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ มากมาย เช่น โปรตีน ไขมัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองเพื่อย่อยโมเลกุลสตาร์ช ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นทำให้ทราบว่า โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชของลูกเดี๋ยถูกห้อมล้อมด้วยโปรตีนทั้งในรูปแบบที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชหรือที่อยู่อิสระ ดังนั้น การที่มีโปรตีนล้อมรอบเม็ดสตาร์ชทำให้โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองจึงมีโอกาสนำไปย่อยสตาร์ชได้ยาก ถึงแม้ว่าการแปรรูปด้วยความร้อนมีส่วนช่วยทำให้แป้งเกิดเจลาทิโนเซชันและเดกซ์ทริโนเซชัน หรือมีส่วนช่วยส่งเสริมการจับกันระหว่างสตาร์ชและโปรตีน ซึ่งการเกิดขึ้นของสารประกอบระหว่างสตาร์ชและโปรตีนนี้มีผลให้โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลอง มีโอกาสเป็นไปได้ยากมากยิ่งขึ้น (Lai และคณะ, 2000; Englyst และคณะ, 1992; Holm และคณะ, 1983; Hoover และ Sosulski, 1985; Ring และคณะ, 1987)



ตารางที่ 4.11 ผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วย เอนไซม์

Thermal processes	condition	DG (%)	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)
extrusion	75% mc. 120 °C	73.00±3.46 <sup>b</sup>	26.02±0.79	33.76±0.83	40.22±1.62
autoclave	75% mc. 15 min 120 °C	88.24±0.29 <sup>a</sup>	28.79±0.87	32.01±0.02	39.20±0.88

**หมายเหตุ** mc = moisture content DG= degree of gelatinization RDS= rapidly digestible starch  
SDS= slowly digestible starch และ RS= resistant starch  
ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

#### 4.5 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาว พบว่า ลักษณะของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยขึ้นกับสภาวะการทดลอง โดยที่อุณหภูมิบารเลสูงและความชื้นต่ำมีผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีลักษณะพอง แต่เมื่อความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นที่ทุกอุณหภูมิบารเล มีผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีลักษณะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งพองตัว ค่า DG ของเอกซ์ทรูเดตอยู่ในช่วง 49-91% ซึ่งเมื่อความชื้นสูงขึ้นมีผลให้เกิดเจลลาทีนเซชันของสตาร์ชมีปริมาณลดลง และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้น สภาวะการทดลองด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ให้กับแป้งลูกเดือยไม่มีผลต่อปริมาณ RDS SDS และ RS ซึ่งปริมาณ RDS มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ SDS มีค่าลดลง และปริมาณ RS ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดต พบว่า ที่ความชื้น 35 และ 50% และที่อุณหภูมิบารเลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แสดงพิกความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (cold peak viscosity) เนื่องจากเป็นสภาวะการทดลองที่มีค่า DG ค่อนข้างสูงหรือมีปริมาณของแป้งที่เจลลาทีนเซชันปริมาณมาก เป็นผลให้ค่า WAI ที่สภาวะการทดลองนี้มีค่าสูง ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปยกเว้นที่ความชื้น 20% และค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตมีผลมาจากปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเล ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิบารเลโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยถูกทำลาย หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่ที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารเลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) โครงสร้างผลึกยังคงเหลืออยู่ เนื่องจากเป็นสภาวะการทดลองที่มีค่า DG ต่ำที่สุด antioxidant properties คือ DPPH

radical scavenging activity และ reducing power มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ( $p>0.05$ ) หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันแต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลง ซึ่ง antioxidant properties ของเอกซ์ทรูเดตที่ได้ขึ้นกับสถานะการทดลอง สำหรับปริมาณ coixenolide ของเอกซ์ทรูเดตมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป

สำหรับกระบวนการออโตเคลป พบว่า ค่า DG ของผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในช่วง 88-97% โดยค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการออโตเคลปเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีปริมาณ RDS เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ SDS มีค่าลดลง แต่ปริมาณ RS ไม่เปลี่ยนแปลง และเวลาในการออโตเคลปไม่มีผลต่อ RDS SDS และ RS คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการแปรรูปมีค่าลดลงเมื่อเทียบแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งเวลาในการออโตเคลปไม่มีผลต่อโปรไฟล์ความหนืดที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่า DG ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่เวลาต่าง ๆ มีค่า DG ไม่แตกต่างกันทำให้ปริมาณแป้งที่เจลาทีไนซ์ไม่แตกต่างกันด้วยและมีผลให้ค่า WAI ไม่แตกต่างกันด้วย ค่า WAI และค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป และค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการออโตเคลปเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า DG ตามระยะเวลาในการออโตเคลป โครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดี๋ยถูกทำลายหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลปมีค่าลดลงแต่กระบวนการออโตเคลปไม่มีผลต่อ DPPH radical scavenging และ reducing power เวลาในการออโตเคลปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง antioxidant properties และปริมาณ coixenolide

การแปรรูปแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และกระบวนการออโตเคลปให้ปริมาณ RDS, SDS และ RS ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ถึงแม้จะมีค่า DG ที่แตกต่างกัน

#### 4.6 รายการอ้างอิง

ณัฐชนก อมรเทวภัทร, เสกสม อาตมางกูร และสายชล เลิศสุวรรณ. (2548). ผลของอัตราการใช้ของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ. หน้า 24-32.

ยูริ วันดี, จูรีรัตน์ พุดตาลเล็ก, วิไล รังสาดทอง และ ดุษฎี อุตภาพ (2552). ผลของสถานะในการเจลาตีไนซ์และการเก็บเจลต่อการเกิด resistant starch ในแป้งพุทธรักษา. ใน 35<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand.

Alonso, A. G., Calixto, F. S. and Delcour, J. A. (1998). Influence of botanical source and processing on formation of resistant starch type III. *Cereal Chem.* 75(6): 802-804.

- Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F. and Griffin, E. L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. **Cereal Sci. Today**. 14: 4-7.
- Bhattacharya, M., and Hanna, M. A. and Kaufman, R. E. (1986). Textural properties of extruded plant protein blends. **J. Food Sci.** 51(4): 988-993.
- Bhattacharya, M. and Hanna, M. A. (1987). Textural properties of extrusion-cooked corn starch. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 20(4): 195.
- Bhattacharya, S., Chakraborty, P., Chattoraj, D. K. and Mukherjee, S. (1997). Physicochemical characteristics of extruded snacks prepared from rice (*Oryza sativa* L.) and chickpea (*Cicer arietinum*) by single screw extrusion. **J. Food Sci. Technol.** 34(4): 320-323.
- 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.
- Chang, S. M. and Chang, T. L. (1998). Effect of various thermal treatments on the physicochemical properties of adlay. **Bull. Inst.** 45: 55-65.
- 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.
- Chang, Y. K., Bustos, F. M. and Lara, H. (1998). Effect of some extrusion variables on rheological properties and physicochemical changes of cornmeal extruded by twin screw extruder. **Braz. J. Chem. Eng.** 15(4) [html].
- Charbonniere, R., Duprat, F. and Guilbot, A. (1973) Changes in Various Starches by extrusion-cooking processing. II. Physical Structure of Extruded Products. (Abstract). **Cereal Sci. Today**. 18: 286.
- Ding, Q. B., Ainsworth, P., Plunkett, A., Tucker, G. and Marson, H. (2006). The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. **J. Food Eng.** 73: 142-148.
- Ekanayake, S., Nair, B. M., Asp, N. G. and Jansz, E. R. (2006). Effect of processing of sword beans (*Canavalia gladiata*) on physicochemical properties of starch. **Starch/Stärke**. 58: 215-222.
- Englyst, K. N., Englyst, H. N., Hudson, J. G., Cole, T. J. and Cummings, J. H. (1999). Rapidly available glucose in foods: an in vitro measurement that reflects the glycemic response. **Am. J. Clin. Nutr.** 69: 448-454.

- Englyst, H. N., Kingman, S. M. and Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **Euro. J. Clin. Nutr.** 46: 33-50.
- 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 Engi.** 32: 251-267.
- Gujral, H. S., Singh, N. and Singh, B. (2001). Extrusion behaviour of grits from flint and sweet corn. **Food Chem.** 74: 303-308.
- Gutkoski, L. C. and Dash, A. A. EL. (1999). Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. **Plant Foods for Human Nutrition** 54: 315-325.
- Hagenimana, A., Ding, X. and Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. **J. Cereal Sci.** 43: 38-46.
- Holm, J., Bjorck, I., Ostrowska, S., Eliasson, A. C., Asp, N. G., Larrson, K., Lundquist, L. (1983). Digestibility of amylase-lipid complexes in vitro and in vivo. **Starch/Stärke** 35 (9): 294-297.
- Hoover, R. and Sosulski, F. W. (1985). Studies on the functional characteristics and digestibility of starches from *Phaseolus vulgaris* biotype. **Starch/Stärke** 37: 181-191.
- Infante, G. J. A., Guzman, R. N. E., Laredo, G. R. F. and Alonso, P. J. (2010). Effect of processing on the antioxidant properties of extracts from Mexican barley (*Hordeumvulgare*) cultivar. **Food Chem.** 119: 903-906.
- Kadan, R. S., Bryant, R. J. and Pepperman, A. B. (2003). Functional properties of extruded rice flours. **J. Food Sci.** 68(5): 1669-1672.
- Kadan, R. S. and Pepperman, A. B. (2002). Physicochemical properties of starch in extruded rice flours. **Cereal Chem.** 79(4): 476-480.
- Kang, B-S., Kim, B-Y. and Hahm, Y-T. (2001). Optimization of the extrusion processing conditions for Job's tear. **Food Sci. Biotechnol.** 10(2): 123-127.
- Ilo, S., Liu, Y. and Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. **Lebensm. Wiss. U. Technol.** 32: 79-88.
- Lai, V. M.-F., Lu, S. and Lii, C.-Y. (2000). Molecular characteristics influencing retrogradation kinetics of rice amylopectins. **Cereal Chem.** 77: 272-278.

- Liu, H., Corke, H. and Ramsden, L. (2000). The effect of autoclaving on the acetylation of ae, wx, and normal maize starches. **Starch/Stärke** 52: 353-360.
- Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H. E. (1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. **Cereal Chem.** 68(3): 227-234.
- Mercier, C. and Feillet, P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion cooking of cereal products. **Cereal Chem** 52: 283-297.
- Miles, M. J., Morris, V. J. and Ring, S. G. (1985). The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. **Carbohydr. Res.** 135: 271-281.
- Nacz, M. and Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereals, fruits and vegetables: occurrence, extraction and analysis. **J. Pharmaceut. Biomed. Anal.** 41: 1523-1542.
- Niba, L. L. (2003). Effect of storage period and temperature on resistant starch and  $\beta$ -glucan content in cornbread. **Food Chem.** 83: 493-498.
- Onyango, C., Bley, T., Jacob, A., Henle, T. and Rohm, H. (2006). Influence of incubation temperature and time on resistant starch type III formation from autoclaved and acid-hydrolysed cassava starch. **Carbohydr. Polym.** 66: 494-499.
- Owusu, A. J., van de Voort, F. R. and Stanley, D. W. (1993). Physicochemical changes in corn starch as a function of extrusion variables. **Cereal Chem.** 60: 319-324.
- Oyaizu, M. (1986). Studied of products of browning reaction: antioxidant activities of products of browning reaction prepared from glucosamine. **Jpn. J. Nutr.** 44: 307-315.
- Prakash, A. (2001). Analytical progress antioxidant activity. **Medallion Laboratories.** 19:1-6.
- Ring, S. G., Colonna, P., Ranson, K. J., Kalicheverky, M. T., Miles, M. J., Morris, V. J. and Orford, P. D. (1987). The gelation and crystallization of amylopectin. **Carbohydr. Res.** 162: 277-293.
- Roos, Y. H. (1995). **Phase transitions in foods.** Academic press, Inc. United Kingdom.
- Saguilán, A. A., Huicochea, E. F., Tovar, J., Suárez, F. G., Meraz, F.G. and Pérez, L. A. B. (2005). Resistant starch-rich powders prepared by autoclaving of native and lintnerized banana starch : partial characterization. **Starch/Stärke.** 57: 405-412.
- Sensoy, I., Rosen, R. T., Ho, C. T., and Karwe., M. V. (2006). Effect of processing on buckwheat phenolics and antioxidant activity. **Food Chem.** 99: 388-393

- 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. **Food Chem.** 100: 198-202.
- Skrabanja, V. and Kreft, I. (1998). Resistant starch formation following autoclaving of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) groats. an in vitro study. **J. Food Chem.** 46: 2020-2023.
- Soto, R. A. G., Acevedo, E. A., Feria, J. S., Villalobos, R. R. and Pérez, L. A. B. (2004). Resistant starch made from banana starch by autoclaving and debranching. **Starch/Stärke.** 56: 495-499.
- Soto, R. A. G., Escobedo, R. M., Sánchez, H. H., Rivera, M. S. and Pérez, L. A. B. (2007). The influence of time and storage temperature on resistant starch formation from autoclaved debranched banana starch. **Food Res. Int.** 40(2): 304-310.
- Tseng, Y. H., Yang, J. H., Chang, H. L., Lee, Y. L. and Mau, J. L. (2005). Antioxidant properties of methanolic extracts from monaschal adlay. **Food Chem.** 97: 375-381.
- Yang, S-H., Peng, J., Lui, W-B. and Lin, J. (2008). Effect of adlay species and rice flour ratio on the physiochemical properties and texture characteristic of adlay-based extrudates. **J. Food Eng.** 84: 489-494.
- Zhang, M., Chen, H., Li, J., Pei, Y. and Liang, Y. (2010). Antioxidant properties of tartary buckwheat extracts as affected by different thermal processing methods. **Food Sci. Tech.** 43: 181-185.
- Zielinski, H., Kozłowska, H. Lewczuk, B. (2001). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. **Innovat. Food Sci. Emerg. Tech.** 2: 159-169

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างของเมล็ดลูกเดือยทั้งพันธุ์ขาวและดำมีลักษณะกลมและรีคล้ายคลึงกับลักษณะเมล็ดข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์แต่มีขนาดใหญ่กว่า ส่วนของคัพภะถูกโอบล้อมด้วยส่วนของเอนโดสเปิร์มและต่อกับส่วนของ black layer และมีขนาดประมาณ 1 ใน 3 ของทั้งเมล็ด ปริมาณโปรตีนและไขมันของลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำ ในขณะที่ปริมาณเถ้าของลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำทั้งในแป้งเต็มเมล็ดและแป้งที่แยกส่วนคัพภะออก สำหรับ antioxidant properties คือ DPPH radical scavenging activity reducing power และปริมาณ coixenolide ของลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ การแยกส่วนคัพภะออกมีผลให้องค์ประกอบในส่วนของไขมันและเถ้ามีปริมาณลดลง ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง คือ กำลังการพองตัวและคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งที่แยกคัพภะออกมีค่าสูงกว่าแป้งลูกเดือยเต็มเมล็ด แต่ค่าการละลายให้ผลในทางตรงกันข้าม สตาร์ชลูกเดือยมีลักษณะกลม หลายเหลี่ยม มีขนาดอนุภาคช่วง 11.68-12.29 ไมครอน โครงสร้างผลึกแสดงลักษณะแบบ A ขนาดของอะไมโลเพคตินเฉลี่ยที่ degree of polymerization 20.78-21.01 อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชอยู่ในช่วง 63-81 องศาเซลเซียส การเกิดรีโทรเกรเดชันของลูกเดือยใช้ระยะเวลา 39 วันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ค่าการละลาย คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทั้งทางด้านความหนืดและอุณหภูมิของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ในขณะที่กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำ

กระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และอโตเคลปของแป้งลูกเดือยพันธุ์ขาวมีผลต่อสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์และคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพ โดยกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการมีผลทำให้ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index) ดัชนีการละลาย (water solubility index) ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch, RDS) มีปริมาณเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) มีปริมาณลดลง แต่ปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) ไม่เปลี่ยนแปลง โปรไฟล์ความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปมีค่าลดลงซึ่งขึ้นกับสภาวะการแปรรูปและกระบวนการแปรรูป โครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการแปรรูปถูกทำลายด้วยความร้อน การแปรรูปด้วยกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการมีผลต่อ antioxidant properties โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ

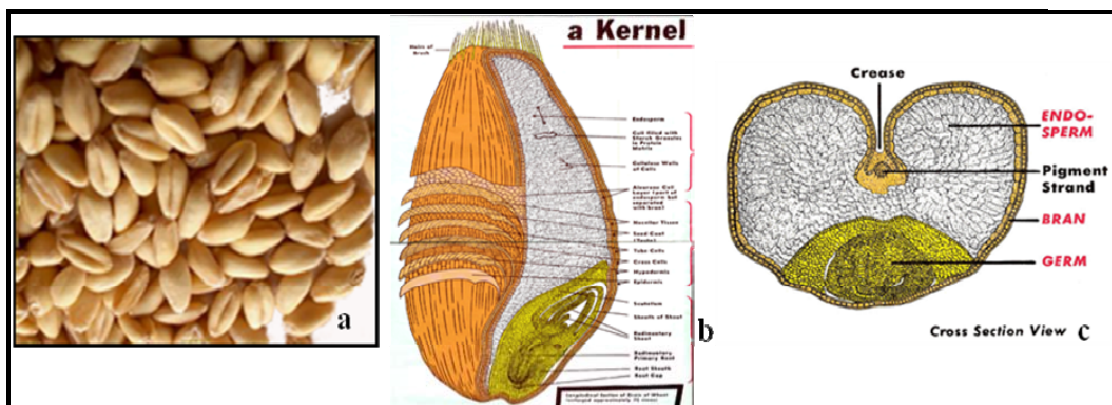
การแปรรูปทั้ง 2 กระบวนการมีค่าลดลง แต่ DPPH radical scavenging activity และ reducing power ไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณ coixenolide ของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับวิธีการแปรรูปและสภาวะการทดลอง นอกจากนี้ ปริมาณสารชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ คือ RDS SDS และ RS ไม่ได้รับอิทธิพลจากการแปรรูปด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน



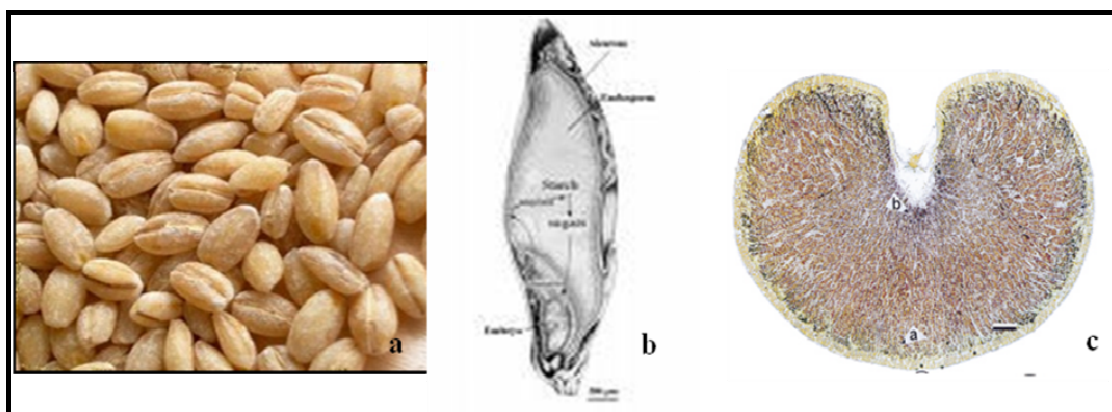
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ลักษณะทางสรีรวิทยาของเมล็ดธัญพืชต่างๆ

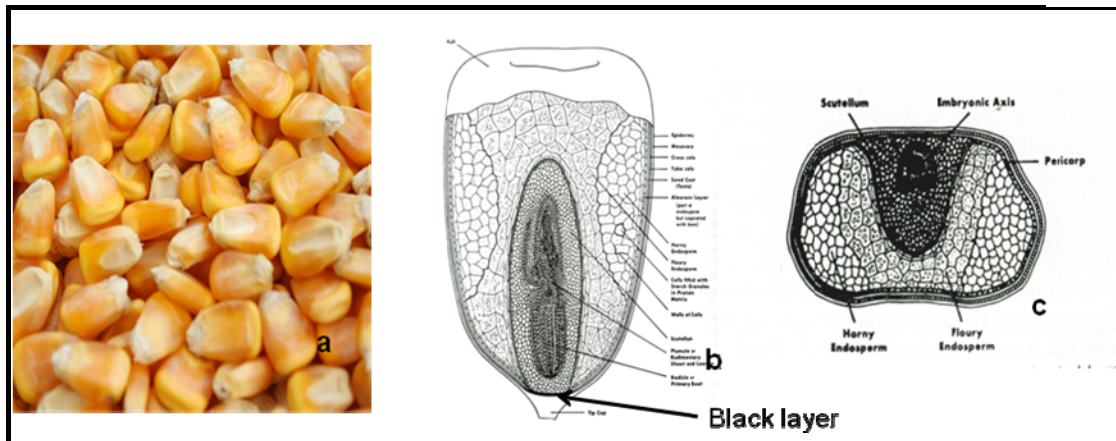


ภาพที่ 1ก ลักษณะรูปร่างของเมล็ด (a) ภาพแนวยาว (b) และภาพตัดขวาง (c) ของเมล็ดข้าวสาลี  
ที่มา: [www.namamillers.org/prd\\_w.html](http://www.namamillers.org/prd_w.html)

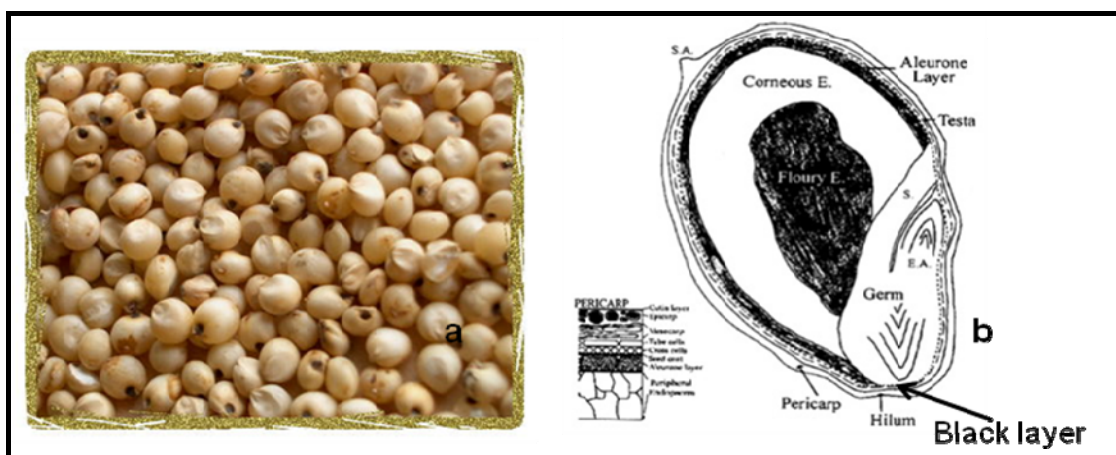


ภาพที่ 2ก ลักษณะรูปร่างของเมล็ด (a) ภาพแนวยาว (b) และภาพตัดขวาง (c) ของเมล็ดข้าวบาร์เลย์  
ที่มา: Andersson., Andersson, Autio และ Man (1999) และ [www.bio.psu.edu/faculty/gilroy/grain](http://www.bio.psu.edu/faculty/gilroy/grain).

GIF



ภาพที่ 3 ลักษณะรูปร่างของเมล็ด (a), ภาพแนวยาว (b) และภาพตัดขวาง (c) ของเมล็ดข้าวโพด  
ที่มา: Hosney (1994) และ en.jlshengda.com



ภาพที่ 4 ลักษณะรูปร่างของเมล็ด (a) และภาพแนวยาว (b) ของเมล็ดข้าวฟ่าง  
ที่มา : Waniska (2000) และ www.purcellmountainfarms.com

ภาคผนวก ข

สภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ตารางที่ 1x รูปแบบการจัดเรียงสกรู (เริ่มจากส่วนที่ป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)

Screw element type	No. of screw
1.5 D Feed screw	6
1.0 D Feed screw	2
60° Forward paddles	4
1.5 D Feed screw	2
60° Forward paddles	4
1.0 D Single Lead screw	2
30° Forward paddles	5
30° Reverse paddles	4
1.0 D Single Lead screw	1
60° Forward paddles	6
60° Reverse paddles	5
1.0D Disch. single leed screw	1

ตารางที่ 2x รูปแบบของอุณหภูมิในแต่ละช่วงบารเรลที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเกรดต่าง ๆ

Barrel Temperature Zone (°C)				Product
1	2	3	4	Temperature (°C)
40	60	80	90	90
60	80	100	120	120
90	110	130	150	150

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติการเกิดเพชรของแป้งลูกเดียวที่ผ่านการแปรรูป  
ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและอโตเคลป

ตารางที่ 1ค คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Extrusion conditions	Pasting parameter (RVU)					Pasting temperature (° C)
	Peak viscosity	Trough viscosity	Break down	Final viscosity	Setback	
Native	31.11±1.30	28.80±0.89	2.31±0.42	46.16±1.38	17.36±0.55	32.13±1.68
20-MT	11.48±1.53	-9.17±0.04	20.65±1.43	-9.43±0.18	-0.31±0.08	25.28±0.05
20-HT	15.54±1.16	-9.53±0.16	25.07±1.00	-10.07±0.14	-0.54±0.02	25.33±0.24
35-LT	6.14±0.04	1.89±0.16	4.25±0.12	6.57±0.61	4.68±0.45	25.25±0.07
35-MT	4.69±1.62	-4.21±0.29	8.90±1.33	-5.01±0.10	-0.81±0.19	25.20±0.07
35-HT	24.31±0.78	-4.85±0.49	29.16±0.30	-3.85±0.96	1.00±0.47	25.08±0.07
50-LT	2.30±0.39	-1.53±0.24	3.83±0.16	1.80±0.28	3.33±0.51	28.05±0.71
50-MT	13.95±2.71	-1.10±0.26	15.05±2.97	3.95±0.20	5.04±0.45	29.43±0.29
50-HT	21.37±1.99	-1.53±0.31	22.90±1.68	3.42±0.12	4.94±0.19	56.75±0.21

หมายเหตุ LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature

ตารางที่ 2ค คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการออโตเคลป

Time of autoclave (min)	Pasting parameter (RVU)					Pasting temperature (° C)
	Peak viscosity	Trough viscosity	Break down	Final viscosity	Setback	
Native	31.11±1.30	28.80±0.89	2.31±0.42	46.16±1.38	17.36±0.55	32.13±1.68
15	55.02±1.39	-0.38±0.57	55.39±0.82	3.89±1.42	4.21±0.85	25.27±0.42
30	57.51±3.52	-0.07±0.92	57.58±2.59	5.22±1.14	5.29±0.22	25.35±0.26
45	58.76±1.59	-0.42±0.94	59.09±0.52	4.29±2.02	4.71±1.08	25.43±0.11
60	64.13±2.26	0.39±0.04	63.74±2.33	6.77±0.61	6.38±0.57	25.25±0.05



**ภาคผนวก ง**  
**ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ**

ตารางที่ 1ง ความแปรปรวน (analysis of variance) ของความชื้นและอุณหภูมิใบเรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

Source	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F (p-value)
Model	7	2898.09	414.01	105.74	0.0001
Error	8	31.32	3.92		
Corrected Total	15	2929.41			
MOIS	2	1019.98	509.99	130.25	0.0001
TEMP	2	2237.71	1118.86	285.76	0.0001
MOIS*TEMP	3	0.00	0.00	0.00	1.0000

**หมายเหตุ** R-Square = 0.9893 C.V. = 2.6400 Root MSE = 1.9787

ตารางที่ 2ง ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิใบเรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งที่ข่อยได้เร็ว

Source	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F (p-value)
Model	7	4.78	0.68	1.36	0.3376
Error	8	4.03	0.50		
Corrected Total	15	8.81			
MOIS	2	0.10	0.05	0.10	0.9076
TEMP	2	0.77	0.38	0.76	0.4968
MOIS*TEMP	3	3.91	1.30	2.59	0.1256

**หมายเหตุ** R-Square = 0.5425 C.V. = 2.7365 Root MSE = 0.7096

ตารางที่ 3ง ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิ바เรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งที่ข่อยได้ซ้ำ

Source	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F (p-value)
Model	7	32.69	4.67	2.00	0.1754
Error	8	18.64	2.33		
Corrected Total	15	51.33			
MOIS	2	8.82	4.41	1.89	0.2125
TEMP	2	13.80	6.90	2.96	0.1091
MOIS*TEMP	3	10.07	3.36	1.44	0.3014

**หมายเหตุ** R-Square = 0.6368 C.V. = 4.5447 Root MSE = 1.5266

ตารางที่ 4ง ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิ바เรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์

Source	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F (p-value)
Model	7	20.91	2.99	1.16	0.4166
Error	8	20.64	2.58		
Corrected Total	15	41.55			
MOIS	2	10.00	5.00	1.94	0.2058
TEMP	2	8.96	4.48	1.74	0.2363
MOIS*TEMP	3	1.94	0.65	0.25	0.8583

**หมายเหตุ** R-Square = 0.5033 C.V. = 3.9681 Root MSE = 1.6061

ตารางที่ 5ง ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิ바เรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำ

Source	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F (p-value)
Model	7	127.79	18.26	71.40	0.0001
Error	8	2.05	0.26		
Corrected Total	15	129.83			
MOIS	2	66.23	33.11	129.52	0.0001
TEMP	2	22.11	11.06	43.24	0.0001
MOIS*TEMP	3	39.45	13.15	51.43	0.0001

**หมายเหตุ** R-Square = 0.9842 C.V. = 9.6619 Root MSE = 0.5056

ตารางที่ 6ง ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิ바เรลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการละลาย

Source	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F (p-value)
Model	7	7254.32	1036.33	1096.34	0.0001
Error	8	7.56	0.95		
Corrected Total	15	7261.89			
MOIS	2	7078.42	3539.21	3744.15	0.0001
TEMP	2	584.61	292.31	309.23	0.0001
MOIS*TEMP	3	0.00	0.00	0.00	1.0000

**หมายเหตุ** R-Square = 0.9990 C.V. = 3.4537 Root MSE = 0.9722

ตารางที่ 7ง สหสัมพันธ์ (correlation) ของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

	R-square	Prob >  R	F Value	Prob>F
DG vs WAI	0.015	0.122	0.090	0.774
DG vs WSI	0.306	0.553	2.644	0.155
DG vs RDS	0.294	0.543	2.503	0.165
DG vs SDS	0.517	(-)0.719	6.410	0.045
DG vs RS	0.408	0.639	4.138	0.088

**หมายเหตุ** Prob > |R| = pearson correlation; r, DG = degree of gelatinization WAI = water absorption index WSI = water solubility index RDS = rapidly digested starch SDS = slowly digested starch และ RS = resistant starch

ตารางที่ 8ง สหสัมพันธ์ของกระบวนการอโตเคลป

	R-square	Prob >  R	F Value	Prob>F
DG vs WAI	0.447	0.668	1.614	0.332
DG vs WSI	0.972	0.986	68.610	0.014
DG vs RDS	0.891	(-)0.944	16.347	0.056
DG vs SDS	0.633	0.796	3.454	0.204
DG vs RS	0.739	0.860	5.677	0.140

**หมายเหตุ** Prob > |R| = pearson correlation; r DG = degree of gelatinization WAI = water absorption index WSI = water solubility index RDS = rapidly digested starch SDS = slowly digested starch และ RS = resistant starch

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิราภรณ์ ชัยสิริเจริญกุล เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดสุวรรณ และระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสตรีมหาพฤฒาราม จังหวัดกรุงเทพมหานคร และจบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย 2 จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2544 และเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2548 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2548

