



รายงานการวิจัย

องค์ประกอบและคุณสมบัติของแป้งลูกเดือยเพื่อเป็นส่วนผสมอาหารเพื่อสุขภาพ
(Composition and Properties of Adlay Flour for Functional Food Ingredient)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

องค์ประกอบและคุณสมบัติของแป้งลูกเดี๋ยเพื่อเป็นส่วนผสมอาหารเพื่อสุขภาพ
(Composition and Properties of Adlay Flour for Functional Food Ingredient)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2549-2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2549-2550 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับอาคาร สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัย ขอขอบคุณบริษัท ซีซีพี นอร์เทิร์น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ลูกเดือย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาดผู้ช่วยวิจัย เหล่านี้ คือ นางสาวสุภาพร อภิรัตนานุสรณ์ และนางสาวจิราภรณ์ ชัยสิริเจริญกุล จึงขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย



บทคัดย่อ

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกขาวและเปลือกดำ พบว่า มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร และสตาร์ช ในช่วง 13.6 – 16.1, 5.2 – 5.6, 1.4 – 1.7, 14.7 – 17.4 และ 66.5 – 69.6% ตามลำดับ สตาร์ชลูกเดี๋ยยแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A เมื่อตรวจสอบด้วย X-ray diffraction รูปร่างเม็ดสตาร์ชเป็นแบบกลม หลายเหลี่ยม และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย 11.68-12.29 ไมครอน อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดี๋ยยมีขนาดเฉลี่ยที่ degree of polymerization 20.78-21.01 ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาที่ในเซชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยยที่ศึกษาด้วย Differential Scanning Calorimetry มีค่า 67 - 81 องศาเซลเซียส การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชใช้ระยะเวลา 39 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส คุณสมบัติการเกิดเพสท์วิเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่า สตาร์ชลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกขาวให้ความหนืดสูงสุดและค่าเบรคควานสูงกว่าพันธุ์เปลือกดำ กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกดำมีค่าสูงกว่า แต่ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกดำมีค่าต่ำกว่าพันธุ์เปลือกขาว

เมื่อนำแป้งลูกเดี๋ยยจากลูกเดี๋ยยชนิดสีทั้ง 2 ชนิดมาผ่านการกลั่นไหลกลับ (reflux) ของเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70 แล้วนำกากที่ได้นำมาสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และสารละลายค่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ พบว่า ไม่พบพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch polysaccharides) ในส่วนที่สกัดโดยใช้น้ำ (water-extractable fraction) แต่พบในส่วนที่สกัดโดยใช้สารละลายค่าง ส่วนที่สกัดโดยใช้ค่าง (alkali extracts) หรือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ (water-unextractable fraction) โดยส่วนนี้มีปริมาณโปรตีนอยู่สูงถึง 38.4-47.8 % และมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ยังมีปริมาณของเถ้าสูง โดยพบว่าส่วนใหญ่เป็นฟอสฟอรัสและแคลเซียม มอนอแซ็กคาไรด์ที่พบในส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกขาวและพันธุ์เปลือกดำประกอบด้วยอะราบินอส 5.1 – 6.6% ไชโลส 4.1 -5.3% กลูโคส 4.9 – 5.6 % และกรดยูโรนิก 1.7 – 2.1 % และพบว่ามีกาแลกโตสและแมนโนสเพียงเล็กน้อย อะราบินอไซแลนจากลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกขาวและเปลือกดำมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) 1,449,000 และ 741,000 ดาลตัน และมีค่า polydispersity index (Pd) เท่ากับ 1.5 และ 2.6 ตามลำดับ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของอะราบินอไซแลนเมื่อผ่านการใช้เอนไซม์โปรติเอสมีค่าลดลงเหลือ 244,000 ดาลตัน (Pd 1.6) และ 369,000 ดาลตัน (Pd 2.7) ตามลำดับ อัตราส่วนอะราบินอไซโลสของลูกเดี๋ยยพันธุ์เปลือกขาวและเปลือกดำมีค่า 1.25 และ 1.27 ตามลำดับ แสดงว่าอะราบินอไซแลนในเนื้อเมล็ดลูกเดี๋ยยมีกิ่งก้านสูง การวิเคราะห์ด้วยวิธี

เมธิลเลชันและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ พบว่า โครงสร้างของอะราบิโนไซแลนประกอบด้วยสายหลักของไซแลน (xylan) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β (1, 4) ของ ไซโลส โดยมี α -L อะราบิโนส 1 โมเลกุล ต่อเป็นกิ่งก้านในปริมาณสูง โดยส่วนใหญ่เกาะอยู่ที่พันธะตรงตำแหน่ง O-3 และส่วนหนึ่งเกาะอยู่ที่พันธะตรงตำแหน่ง O-2 และ O-3 ของไซโลส

คุณสมบัติทางเคมี และเคมีกายภาพของแป้งลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาวที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้ศึกษาที่ความชื้น 20, 35 และ 50% อุณหภูมิบารเรลที่ 90, 120, 150 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 150 รอบต่อนาที มีผลทำให้ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลาย มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ slowly digested starch คุณสมบัติการเกิดเพสที่วิเคราะห์ด้วย RVA มีค่าลดลง แต่ปริมาณ resistant starch ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ส่วนโครงสร้างกิ่งผลึกของแป้งลูกเดือยถูกทำลายโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน สำหรับ antioxidant properties นั้น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ DPPH radical scavenging activity และ reducing power ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปมีค่าไม่แตกต่างจากแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ($p>0.05$) ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปมีค่าเพิ่มขึ้น



Abstract

The Chemical composition of adlay, white husk and black husk, was investigated. They contained 13.6-16.1% protein, 5.2-5.6% fat, 1.4-1.7% ash, 14.7-17.4% dietary fiber and 66.5-69.6% starch. Adlay starch exhibited an A-pattern crystalline structure as monitored by X-ray diffraction. The starch morphology was round and polygonal in shapes with average granular size of 11.68-12.29 micron. The average chain length of amylopectin was the degree of polymerization of 20.78-21.01. The gelatinization temperature of adlay starch monitored by differential scanning calorimetry showed a range of 67-81°C. The retrogradation of starch was observed after 39 days at 4°C. Pasting properties analyzed using a Rapid Visco Analyzer exhibited that the peak viscosity and breakdown of the white husk adlay higher than those of the black one. The swelling power of the black husk adlay was higher but the solubility was lower as compared with the white one.

Adlay flour that prepared from both types of polished adlay was refluxed with 70% ethanol. The residual was extracted with water at 75°C and then with 0.5 M NaOH. Non-starch polysaccharides were not found in a water-extractable fraction but present in an alkali-extractable fraction. The alkali extract or water-unextractable fraction from both types of adlay contained 38.4-47.8% protein and they had a similar amino acid composition as well as high ash content, phosphorus and calcium. The monosaccharides of water-unextractable fraction from both adlays were 5.1-6.6% arabinose, 4.1-5.3% xylose and 4.9-5.6% glucose but galactose and mannose were found to be a small content. The arabinoxylans from the white and dark husk adlay showed an average molecular weight (MW) of 1,449,000 and 741,000 Da with a polydispersity index of 2.6 and 1.5 respectively. The average MW of arabinoxylans reduced after treatment with protease to 244,000 Da (Pd 1.6) and 369,000 Da (Pd 2.7) respectively. The high arabinose/xylose ratio of 1.25 and 1.27 indicated that the arabinoxylans extracted from adlay endosperm had a highly branching structure. With a combination of methylation and NMR analysis, the structural features were elucidated to be (1, 4)-linked β -D-xylan main chain with highly branched side chains, containing a single arabinose. The α -L arabinofuranosyl residues were attached mostly at O-3, followed by at both O-2 and O-3 of xylopyranosyl residues.

The flour of white husk adlay was undergone an extrusion process at a moisture of 20, 30, and 50%, a barrel temperature of 90, 120, 150 °C and a screw speed of 150 rpm. The extruded adlay flour showed an increase in water adsorption index and water solubility index but a decrease in slowly digested starch and pasting profile of RVA. However, the resistant starch content did not changed as compared with the native adlay flour. The extrusion processing destroyed semi-crystalline structure of adlay starch. In terms of antioxidant properties, total phenolic content of the processed adlay flour was decreased when compared to the native flour. DPPH radical scavenging activity and reducing power between the processed Job's tear flour and the native Job's tear flour were not significantly different ($p>0.05$). The coixenolide content was found to be higher in the extruded flour.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำกรวิจัย.....	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
3. วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
1. วัตถุประสงค์.....	15
2. การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ย.....	15
2.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	15
2.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของลูกเดี๋ย.....	15
3. การสกัดและคุณสมบัติของสตาร์ชลูกเดี๋ย.....	15
3.1 การสกัดสตาร์ชลูกเดี๋ยจากแป้งลูกเดี๋ย.....	15
3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชลูกเดี๋ย.....	16
3.2.1 กำลังการพองตัวและการละลาย.....	16
3.2.2 คุณสมบัติการเกิดเพสท์.....	16
3.2.3 อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ของเม็ดแป้ง.....	17
3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณผลึกและลักษณะของผลึกเม็ดแป้ง.....	17
3.2.5 วิเคราะห์โครงสร้างของเม็ดแป้ง.....	18
3.2.6 การวิเคราะห์ขนาดสายโซ่ของอะไมโลเพคติน.....	18
4. การสกัดและวิเคราะห์หองค์ประกอบของ non-starch polysaccharide.....	19
4.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	19
4.2 การสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชจากลูกเดี๋ย.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ non-starch polysaccharide.....	21
4.3.1 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด.....	21
4.3.2 การวิเคราะห์กรดยูโรนิก (Uronic acid) และกรดอะมิโน.....	21
4.3.3 วิเคราะห์ชนิดของมอโนแซ็กคาไรด์.....	21
4.3.4 วิเคราะห์ชนิดของแร่ธาตุ.....	22
5. การวิเคราะห์การกระจายตัวของโมเลกุล (molecular distribution) และ โครงสร้างของสาร non-starch polysaccharide.....	22
5.1 การกระจายขนาดโมเลกุล (Molecular size distribution).....	23
5.2 วิเคราะห์ค่า dn/dc	23
5.3 วิเคราะห์ค่า Intrinsic viscosity.....	23
5.4 การย่อยด้วยเอนไซม์.....	23
5.5 การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชัน (Methylation) และ GC-MS.....	23
5.6 การวิเคราะห์ทาง NMR.....	24
6. การแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion).....	25
6.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	25
6.2 การผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion process).....	25
6.3 การวิเคราะห์ปริมาณ RDS, SDS และ RS.....	25
6.4 การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาทีไนเซชัน.....	26
6.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ.....	27
6.5.1 คุณสมบัติการเกิดเพสต์.....	27
6.5.2 ดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย.....	28
6.5.3 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก.....	29
6.6 การวิเคราะห์ antioxidant properties.....	29
6.6.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ antioxidant properties.....	29
6.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด.....	29
6.6.3 การวิเคราะห์ DPPH radical scavenging activity.....	30
6.6.4 การวิเคราะห์ reducing power.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.7 การวิเคราะห์ปริมาณ Coixenolide.....	31
6.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	32
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล.....	33
1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ย.....	33
2. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของสตาร์ชลูกเดี๋ย.....	34
2.1 กำลังการพองตัวและการละลาย.....	34
2.2 คุณสมบัติการเกิดเพสต์.....	38
2.3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบ โครงสร้างและปริมาณผลึก.....	39
2.4 คุณสมบัติการเกิดเจลลาคีโนเซชัน.....	40
2.5 คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	42
2.6 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช.....	43
2.7 ขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน.....	45
3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชจาก ลูกเดี๋ย.....	46
4. ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดโมเลกุล (molecular distribution) และ โครงสร้างของสาร non-starch polysaccharide.....	49
4.1 การกระจายขนาดโมเลกุลและค่า Intrinsic viscosity ($[\eta]$).....	49
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร non-starch polysaccharide.....	56
4.2.1 การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชัน (Methylation analysis).....	56
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ $^1\text{H NMR}$, $^{13}\text{C NMR}$ และ 2D NMR.....	57
5. ผลการแปรรูปแป้งลูกเดี๋ยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion).....	66
5.1 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเกิดเจลลาคีโนเซชัน.....	66
5.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อย ด้วยเอนไซม์.....	69
5.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ.....	72
5.3.1 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติการเกิดเพสต์.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและ ดัชนีการละลาย.....	77
5.3.3 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อลักษณะ โครงสร้างผลึก.....	82
5.4 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อ antioxidant properties.....	84
5.4.1 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกทั้งหมด.....	84
5.4.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อ DPPH radical scavenging activity.....	86
5.4.3 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อ reducing power.....	88
5.5 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อปริมาณ coixenolide.....	90
บทที่ 4 บทสรุป.....	92
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก.....	108
ประวัติผู้วิจัย.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดในพันธุ์ข้าวและพันธุ์ดำ.....	33
2	คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและพันธุ์ดำ.....	39
3	ปริมาณผลึกของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและพันธุ์ดำ.....	40
4	คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ.....	41
5	คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและดำ หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 39 วัน.....	43
6	ขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวและพันธุ์ดำ.....	44
7	การกระจายของขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าว และพันธุ์ดำ.....	45
8	องค์ประกอบทางเคมีของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดี๋ย (น้ำหนักแห้ง).....	47
9	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุล (MW), radius of gyration (Rg), การกระจายโมเลกุล (Pd), และ intrinsic viscosity [η] ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ วัดโดย HPSEC...	53
10	มอนอแซ็กคาไรด์และองค์ประกอบทางเคมีของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ ก่อนและหลังย่อยด้วยเอนไซม์.....	53
11	Intrinsic viscosity ($[\eta]$) ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ วัดโดย HPSEC and Capillary viscometer.....	55
12	การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชันและรูปแบบพันธะของอะราบีโนไซแลนที่สกัด ไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดี๋ย.....	56
13	Chemical shift (δ) ของสเปกตรัม ^1H NMR และ ^{13}C NMR ของ อะราบีโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดี๋ย และสเปกตรัม TOCSY, HMQC, COSY, และ HMBC.....	64
14	ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราซัน ที่สภาวะการทดลองต่างๆ.....	67
15	สภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตรา การย่อยด้วยเอนไซม์.....	70
16	ผลของกระบวนการเอกซ์ทราซันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย.....	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ปริมาณผลึกของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน.....	83
18	ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทรูเตดจากแป้งลูกเดี๋ย หลังผ่านการ แปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิ บารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส).....	90
1ข	รูปแบบการจัดเรียงสกรู (เริ่มจากส่วนที่ป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน).....	111
2ข	รูปแบบของอุณหภูมิในแต่ละช่วงบารลที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเตดต่างๆ....	111
1ค	คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน.....	112
1ง	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ของความชื้นและ อุณหภูมิบารลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน...	113
2ง	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิบารลของกระบวนการ เอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว.....	113
3ง	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิบารลของกระบวนการ เอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า.....	114
4ง	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิบารลของกระบวนการ เอกซ์ทรูชันต่อปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์.....	114
5ง	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิบารลของกระบวนการ เอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำ.....	115
6ง	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้นและอุณหภูมิบารลของกระบวนการ เอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการละลาย.....	115
7ง	สหสัมพันธ์ (correlation) ของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	116

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชจากลูกเดือย.....	20
2	กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ.....	35
3	ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ.....	36
4	ลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกของลูกเดือยและข้าว.....	40
5	ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b) ภายใต้อุปกรณ์ SEM.....	44
6	การกระจายของขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b).....	45
7	การกระจายของขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และดำ.....	46
8	Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยพันธุ์ดำ วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด.....	51
9	Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยพันธุ์ขาว วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด.....	52
10	Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ดำ วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด.....	54
11	Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ ข วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด.....	54
12	สเปกตรัม ¹ H NMR ของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำเทียบกับ TMS.....	59
13	สเปกตรัม ¹³ C NMR ของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำเทียบกับ TMS....	59
14	โครงสร้างของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย.....	61
15	¹ H/ ¹³ C HMQC correlation ของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ.....	62
16	¹ H/ ¹ H NMR COSY ของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ.....	62
17	¹ H/ ¹ H NMR TOCSY ของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ.....	63
18	¹ H/ ¹³ C HMBC correlation ของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ.....	64
19	ผลของความชื้นและอุณหภูมิบนการเกิดเจลลิตีในเซชัน.....	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลของอุณหภูมิใบเรดต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน.....	73
21	ผลความชื้นของวัตถุดิบต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน.....	75
22	ผลของความชื้นและอุณหภูมิใบเรดต่อดัชนีการดูดซับน้ำ.....	79
23	ลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน.....	82
24	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดี๋ย และเอกซ์ทรูเตดจากแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิใบเรดระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิใบเรดระดับสูง (150 องศาเซลเซียส).....	85
25	DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดี๋ยและ เอกซ์ทรูเตดจากแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่ สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิใบเรดระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิใบเรดระดับสูง (150 องศาเซลเซียส).....	87
26	reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของแป้ง ลูกเดี๋ยและเอกซ์ทรูเตดจากแป้งลูกเดี๋ย หลังผ่านการแปรรูปกระบวนการ เอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิใบเรดระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิใบเรดระดับสูง (150 องศา เซลเซียส).....	89

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ลูกเดือยเป็นพืชในวงศ์หญ้า (Gramineae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Coix lachrymal-jobi* L. (Chang et al., 2003; W.Chiang, Cheng et al., 2000; Li and Cork, 1999) ชื่อในภาษาอังกฤษที่รู้จักทั่วไป คือ coix, Job's tears หรือ adlay เป็นพืชที่มีการเพาะปลูกในประเทศแถบเอเชียหลายประเทศ ได้แก่ ประเทศฟิลิปปินส์ พม่า ศรีลังกา รวมทั้งประเทศไทย (Duke, 1983; D.A. Bender and A.E. Bender, 1999) ทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยนิยมปลูกเดือยข้าวเหนียวมากกว่าเดือยข้าวเจ้าเพราะแป้ง มีความเหนียวนุ่ม และมีกลิ่นหอมมากกว่า (จักรพรรดิ วุฒิสง, 2546) ลูกเดือยเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการเพาะปลูกมากในพื้นที่ จ. เลย และพื้นที่ในจังหวัดใกล้เคียง ได้แก่ จ. ชัยภูมิ อุดรธานี เพชรบูรณ์ และหนองคาย มีการปลูกในช่วงเดือนเมษายน-สิงหาคม และเก็บเกี่ยวช่วงเดือนธันวาคม-มีนาคม ของปีถัดไป ผลผลิตที่ได้จะส่งออกต่างประเทศเป็นหลัก ประเทศที่สำคัญที่รับซื้อได้แก่ประเทศญี่ปุ่น และเกาหลี การจำหน่ายเพื่อบริโภคในประเทศ ยังมีน้อยเมื่อเทียบกับการส่งออก (กระทรวงพาณิชย์, 2546)

เมล็ดเดือยมีรูปร่างกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มม. มีเปลือกแข็งมันวาวตั้งแต่สีน้ำตาลดำไปจนถึงเทาดำ (Li and Cork, 1999) ลูกเดือยที่บริโภคทั่วไปจะจำหน่ายในรูปของเมล็ดที่ผ่านการกะเทาะเปลือกและขัดสีแล้ว ประกอบด้วยสารอาหารต่างๆ ได้แก่ โปรตีน 15% ไขมัน 6% เกลือ 1.6% ไฟเบอร์ 0.24% คาร์โบไฮเดรต 68% สตาร์ช 57% และอะไมโลส 11% (ทัศนีย์พรกิจประสาน, 2530) ซึ่งนอกจากบริโภคเป็นอาหารแล้ว ยังนิยมบริโภคเป็นอาหารเสริมสุขภาพอีกด้วย เนื่องจากพบว่าลูกเดือยมีคุณสมบัติทางยา แม้ว่าจะมีข้อมูลไม่ชัดเจนนัก แต่เชื่อกันว่าการบริโภคลูกเดือยจะทำให้ กระเพาะอาหารและลำไส้แข็งแรง แก้อาการปวดท้องเรื้อรัง บำรุงม้ามและปอด แก้อาการอักเสบมากกว่าปกติ แก้อาการปวด และทำให้ผิวพรรณสดใส (จักรพรรดิ วุฒิสง, 2546) นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าลูกเดือยมีคุณสมบัติด้านการเจริญของเนื้องอก (antitumor) และด้านการเกิดภูมิแพ้ (anti-allergic) (Numata et al., 1994; Kou et al., 2001) Chang et.al (2003) พบว่าสารสกัดจากลูกเดือยโดยใช้เมทานอล (methanol) มีคุณสมบัติด้านการแบ่งตัวอย่างรวดเร็วของเซลล์ที่ผิดปกติ (antiproliferative) และด้านการเจริญของเนื้องอก และมีคุณสมบัติด้านการเกิดภูมิแพ้ อีกด้วย (Hsu et al., 2003) ลูกเดือยยังมีคุณสมบัติเป็นสารพรีไบโอติก (prebiotic) สามารถเพิ่มปริมาณกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) ขึ้นได้ในลำไส้ใหญ่ (Chiang et al., 2000) นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณของไขมันและคอเลสเตอรอลในเลือดได้อีกด้วย (Tsai et al., 1998;

Kim et al., 2004) มีรายงานว่าสาร coixenolide ที่พบในลูกเดือย (Ukita and Tanimura, 1961) และ สารสกัดจากอะซิโตน (Numata et al., 1994) มีคุณสมบัติด้านการเจริญเติบโตของเนื้ออก สาร benzoxazinone มีคุณสมบัติด้านการไหม้ของเซลล์ (anti-inflammatory) (Nagoa et al., 1985) สาร coixan สามารถลดปริมาณน้ำตาลในเลือด (hypoglycemic) (Takahashi et al., 1986) สารพวก neutral lipid ที่สกัดจากส่วนเอนโดสเปิร์ม (endosperm) ของลูกเดือย ยังมีฤทธิ์เป็นสารต้านการเกิด มะเร็งด้วย (Gibbs, 1998; Ho, 2003)

จากรายงานที่กล่าวมา จะเห็นว่ายังขาดข้อมูลพื้นฐานจำเป็นที่เกี่ยวข้องกับสารอาหารกลุ่ม คาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมล็ดลูกเดือย การรายงานเพียงปริมาณสตาร์ช เท่านั้น ยังมีส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นสารชนิดใดในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ซึ่ง คาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้โดยเอนไซม์ในร่างกาย (non-digestible carbohydrate) จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ กลุ่มดังกล่าวได้แก่ non-starch polysaccharide (dietary fiber), resistant starch และ non-digestible oligosaccharide คาร์โบไฮเดรตเหล่านี้จะเคลื่อนที่ผ่านไปยังลำไส้ใหญ่ และส่วนใหญ่จะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ใน ลำไส้ใหญ่ให้กรดไขมันสายสั้นที่มีประโยชน์ต่อการป้องกันการเกิดโรคมะเร็งในลำไส้ (Roland, 2001) นอกจากนี้ non-starch polysaccharide บางชนิด ยังมีบทบาทสำคัญต่อการลดคอเลสเตอรอล ในเลือดได้ด้วย (Fulgoni, 2001) ซึ่งคาร์โบไฮเดรตกลุ่มนี้อาจมีบทบาทที่สำคัญต่อคุณสมบัติทางยา ที่พบในลูกเดือย หรือ resistant starch อาจเป็นสตาร์ชกลุ่มหนึ่งที่มีในลูกเดือย สารกลุ่ม คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดลูกเดือยเหล่านี้เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมล็ด มีผลเกี่ยวข้องกับการนำ เมล็ดลูกเดือยไปบริโภคหรือแปรรูปต่อไป ดังนั้น การศึกษาถึงชนิดและคุณสมบัติบางประการของ non-starch polysaccharide และการศึกษาถึงคุณสมบัติของสตาร์ชในลูกเดือยและ resistant starch จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและจำเป็น จะทำให้ทราบและเข้าใจถึงประโยชน์ทางสุขภาพของลูกเดือยได้ ชัดเจนขึ้น และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจากลูกเดือย และการนำลูก เดือยไปเป็นส่วนผสมของอาหารเพื่อสุขภาพ

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาและตรวจสอบองค์ประกอบและสมบัติของลูกเดือย 2 พันธุ์
- 2.2 เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เคมี และเชิงหน้าที่ของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช(non-starch polysaccharides) ของลูกเดือย
- 2.3 เพื่อศึกษาผลของการแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งลูกเดือย

3. วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลูกเดือย (*Coix lachrymal-jobi* L.)

ลูกเดือยเป็นธัญพืชชนิดหนึ่งในวงศ์ (family) Gramineae 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, 2005) เป็นพืชที่ให้ผลผลิตปีละครั้ง มีความสูงประมาณ 1-3 ม. มีหลายสายพันธุ์ตามขนาดและโครงสร้างของเมล็ด เพาะปลูกในแถบเอเชียและแอฟริกา (D.A.Bender and A.E.Bender, 1999) รวมทั้งในแถบอเมริกาเหนือ (Encyclopedia Britannica, 1997). มีเปลือกแข็งรูปร่างกลมขนาด 0.5-0.8 มม. เปลือกหุ้มมีสีเทา และอาจมีสีงา น้ำตาลและดำ (Purseglove, 1972) เมล็ดลูกเดือยมี 2 ชนิดด้วยกันคือ เมล็ดเปลือกอ่อนที่เพาะปลูกเพื่อบริโภคและเมล็ดเปลือกแข็งใช้ทำเครื่องประดับและลูกประคำ (Arora, 1977) ลูกเดือยที่นิยมปลูกกันทั่วไปในทางการค้าคือ ลูกเดือยพันธุ์ *C. lacryma-jobi* L var. *ma-yuen* สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามเมล็ด ลำต้น และชนิดของสตาร์ช ภายในเมล็ดคือ ลูกเดือยข้าวเหนียว (glutinous type) และลูกเดือยข้าวเจ้า (non-glutinous type) (Vacharotayan, Jan-orn, Cheaorn, Tiatarn and Kingkaew, 1982 อ้างถึงใน ทศนีย์ พรกิจประสาน, 2530) เดือยข้าวเหนียวเป็นเดือยที่ตลาดในประเทศและต่างประเทศมีความต้องการมากกว่าเดือยข้าวเจ้า เนื่องจากแป้งมีความนุ่ม เหนียว และมีกลิ่นหอมมากกว่า เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการเพาะปลูกมากในพื้นที่ จ. เลย และพื้นที่ในจังหวัดใกล้เคียง ได้แก่ จ. ชัยภูมิ อุดรธานี เพชรบูรณ์ และหนองคาย มีการปลูกในช่วงเดือนเมษายน-สิงหาคม และเก็บเกี่ยวช่วงเดือนธันวาคม-มีนาคม ของปีถัดไป ผลผลิตที่ได้จะส่งออกต่างประเทศเป็นหลัก ประเทศที่สำคัญที่รับซื้อได้แก่ประเทศญี่ปุ่น และเกาหลี การจำหน่ายเพื่อบริโภคในประเทศยังมีน้อยเมื่อเทียบกับการส่งออก (กระทรวงพาณิชย์, 2546)

เมล็ดเดือยที่ผ่านการกะเทาะเปลือกและขัดสีมีชื่อสามัญที่รู้จักในประเทศฟิลิปปินส์ว่า “adlay” ส่วนในประเทศจีนเรียกว่า “ma yuen” เมล็ดที่ผ่านการขัดสีนี้นำมาบริโภคเป็นอาหาร เช่นเดียวกับเมล็ดธัญชาติทั่วไป และสามารถนำมาแปรรูปเป็นแป้งได้ (Purseglove, 1972) องค์ประกอบใน 100 กรัม มีพลังงาน 380 แคลอรี น้ำ 11.2 กรัม โปรตีน 15.4 กรัม ไขมัน 6.2 กรัม คาร์โบไฮเดรต 65.5 กรัม ไฟเบอร์ 0.8 กรัม เถ้า 1.5 กรัม แคลเซียม 25 มิลลิกรัม โปแตสเซียม 435 มิลลิกรัม เหล็ก 5 มิลลิกรัม ไทอะมิน 0.28 มิลลิกรัม ไรโบฟลาวิน 0.19 มิลลิกรัม และไนอะซิน 4.3 มิลลิกรัม (Duke, 1983) ศิริพร จันทนา (2529) รายงานว่า เดือยข้าวเหนียวประกอบด้วยความชื้น 10.83 กรัม โปรตีน 13.05 กรัม ไขมัน 5.45 กรัม คาร์โบไฮเดรต 68.60 กรัม และ เถ้า 1.3 กรัม ชนิด

ของโปรตีนที่พบมากที่สุดในกลุ่มคือ โคอิซิน (coixin) ซึ่งเป็นโปรตีนโพรลามีนชนิดหนึ่ง มีกรดอะมิโนโพรลีนและลิซีนในปริมาณสูงแต่มีไลซีนในปริมาณต่ำ นอกจากนี้ยังมีโปรตีนอัลบูมิน และกลบูลิน และอนุพันธ์โปรตีนอื่น ๆ อีก (Ottoboni, Leite, Targon, Crozier and Arruda, 1990)

จากการรายงานการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบว่า ลูกเดือยมีสารสำคัญหลายชนิดซึ่งออกฤทธิ์ทางยาต่อร่างกาย ตัวอย่างเช่น Ukita and Tanimura (1961) พบว่าสาร coixenolide เป็นสารที่สามารถต้านการเจริญของเนื้องอกได้ มีการศึกษาพบว่าสารสกัดจากอะซิโตนที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นกรด (acidic fraction) มีคุณสมบัติเป็นสารต้านการเกิดเนื้องอกเมื่อทดสอบในสิ่งมีชีวิต (vivo test) ส่วนที่เป็นกรดนี้ประกอบด้วยกรดไขมัน 4 ชนิด คือกรดพาลมิติก สเตอริก โอลิอิก และลิโนลิติก Nagoa et al., (1985) รายงานว่าสาร benzoxazinone ที่สกัดได้จากเมล็ดเดือยมีความสามารถในการต้านการไหม้ของเซลล์ Takahashi et al. (1986) พบว่าสารสกัด coixan A B และ C ในเมล็ดสามารถลดระดับน้ำตาลในเลือดได้ Hsu et al. (2003) พบว่าสารสกัดจากเมทานอลสามารถลดสารต้าน OVA IgE (anti-OVA IgE) ซึ่งมีประโยชน์ต่อการรักษาโรคภูมิแพ้ สารสกัดลูกเดือยโดยใช้เมทานอล นอกจากจะมีประโยชน์ต่อการรักษาโรคภูมิแพ้แล้ว ยังมีคุณสมบัติด้านการแบ่งตัวอย่างรวดเร็วของเซลล์มะเร็ง และต้านการเจริญของเนื้องอกในสัตว์ทดลองได้อีกด้วย (Chang et al., 2003; Hung and Chang, 2003) ในประเทศจีนมีการใช้สารสกัดไขมัน (neutral lipid) โดยตั้งชื่อว่า “kanglaite” เป็นไขมันที่ได้จากส่วนของเอนโดสเปิร์มของเมล็ดเดือยนำมารักษาผู้ป่วยจำนวน 270,000 คน พบว่านอกจากมีผลในการต้านการเจริญของเซลล์มะเร็งและฆ่าเซลล์มะเร็งแล้วยังกระตุ้นการสร้างภูมิในการกำจัดเซลล์มะเร็ง ลดความเจ็บปวด และป้องกันการสูญเสียน้ำหนักได้ด้วย อย่างไรก็ตามกลไกหน้าที่การทำงานของ kanglaite ในการรักษายังไม่เป็นที่แน่ชัดนัก

ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่สามารถนำมาบริโภคได้ทั้งในรูปอาหาร และเป็นยาในการบำรุงสุขภาพ เนื่องจากลูกเดือยเป็นธัญพืชที่มีคุณค่าทางด้านโภชนาการสูง จากความเชื่อของชาวจีนและญี่ปุ่น ตั้งแต่สมัยโบราณกาลที่กล่าวไว้ว่า ลูกเดือยเป็นอาหารเพื่อบำรุงสุขภาพ สำหรับในประเทศญี่ปุ่นมีการนำลูกเดือยทำเป็นเครื่องคั่วประเภทข้าวหมักและให้ชื่อว่า dzu นำมาทำเป็นยาต้ม เป็น โฉ๊ก ชา สำหรับชงดื่มและใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อหมักสำหรับทำเป็นเครื่องคั่วแอลกอฮอล์ โดยพบว่าในประเทศญี่ปุ่นมีแนวโน้มของการนำลูกเดือยมาผลิตเป็นอาหารประเภทอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น เนื่องจากเป็นธัญพืชที่มีอัลบูมินและไขมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูง นอกจากนี้ยังมีการนำลูกเดือยมาผลิตเป็นมิโซ ชิอิว แครกเกอร์ ขนมห้าง บิสกิต และอื่น ๆ อีกมากมาย และในประเทศจีนก็มีการนำมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพเช่นเดียวกับประเทศญี่ปุ่น (ศิริพร จันทนา, 2529) นอกเหนือจากประเทศจีนและญี่ปุ่นแล้วในประเทศศรีลังกาก็มีการนำลูกเดือยมาใช้เป็นอาหารหลักแทนอาหารประเภทข้าว (ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอรนงค์ นัยวิกุล, 2531) จากความนิยมในการนำลูกเดือยมาใช้ จึงได้มี

การศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ ในการศึกษาของศิริพร จันทนา (2529) ได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยเพื่อนำมาผลิตเป็นขนมจีน พบว่า แป้งลูกเดี๋ย (flour) ประกอบด้วยปริมาณโปรตีน 13.05% ไขมัน 5.45% คาร์โบไฮเดรต 68.60% ไฟเบอร์ 0.36% และเถ้า 1.3% และการศึกษาของทัศนีย์ พรกิจประสาน (2530) ซึ่งทำการศึกษายกองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของแป้งและสตาร์ช ลูกเดี๋ยพันธุ์ผสมที่มีขายในท้องตลาด พบว่า ในแป้งลูกเดี๋ยมีปริมาณโปรตีน 14 -16% ไขมัน 5-6% เถ้า 1-2% เยื่อใย 0.2-0.3% คาร์โบไฮเดรต 77-78% และสตาร์ช 56-57% ส่วนสตาร์ชลูกเดี๋ย มีปริมาณโปรตีน 2.79% ไขมัน 0.78% เถ้า 0.29% อะไมโลส 10.85% และอะไมโลเพคติน 89.15% สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของแป้งและสตาร์ชลูกเดี๋ย พบว่า ความสามารถในการอุ้มน้ำและการละลายของแป้งมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดี๋ย แต่สตาร์ชมีค่ากำลังการพองตัว ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาคติในเซชันและความหนืดสูงกว่าในแป้งลูกเดี๋ย และการศึกษาของ Li และ Corke (1999) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพระหว่างสตาร์ชลูกเดี๋ยพันธุ์ข้าวเหนียว และพันธุ์ข้าวเจ้า 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 (ΔH) ในพันธุ์ข้าวเจ้ามีค่าใกล้เคียงกับพันธุ์ข้าวเหนียว ส่วนคุณสมบัติการเกิดเพสต์ (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

3.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแป้ง

สตาร์ช จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ ที่พบมากที่สุดเ็นในแอนโดสเปิร์มของธัญพืชประมาณร้อยละ 90 โดยโมเลกุลของสตาร์ชรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของธัญพืช เช่น ข้าว มีขนาดของเม็ดสตาร์ชประมาณ 3-5 ไมครอนและมีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม ข้าวโพดมีขนาดของเม็ดสตาร์ชประมาณ 5-25 ไมครอนและมีรูปร่างลักษณะกลมแบน มีหลายเหลี่ยม หรือในมันฝรั่ง จะมีขนาดของเม็ดสตาร์ช

ประมาณ 15-121 ไมครอนและมีรูปร่างลักษณะกลม รูปไข่มีลักษณะคล้ายเปลือกหอย เป็นต้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวขนาดใหญ่ ซึ่งโดยส่วนใหญ่โครงสร้างของสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิดเป็นหลัก คือ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน

อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์สายตรง ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage ส่วนอะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสสายตรงขนาดสั้นที่มีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 10-60 หน่วย (degree of polymerization, DP = 10-60) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และมีส่วนเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งก้านด้วยพันธะ α -1,6 glycosidic linkage ซึ่งมีปริมาณ 5% ของปริมาณ glycosidic bond ทั้งหมด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) จากการศึกษพบว่ามีการคิดค้นแบบจำลองของอะไมโลเพคตินไว้มากมายนับตั้งแต่ปี 1937 แต่ในปัจจุบันแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับ คือ แบบจำลองของ Hizukuri (1986) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพคติน ซึ่งโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ อีก 2 สายหรือมากกว่า สุดท้ายสาย C (C-chain) สำหรับสายนี้จัดเป็นสายแกนหลัก ซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ โดยโมเลกุลอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

สตาร์ชสามารถแบ่งตามอัตราการย่อยของสตาร์ช (rate of digestion) อัตราการปลดปล่อยกลูโคส (rate of glucose release) และการดูดซึมภายในทางเดินอาหารออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ แป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested 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, Ao, และ Hamaker, 2006)

3.2.1 แป้งย่อยได้เร็ว

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

3.2.2 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, Ao, และ Hamaker, 2006)

จากงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้าง และคุณสมบัติการย่อยของสตาร์ช (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 สูงแต่ปริมาณ RS ต่ำ (Chung, Liu, Pauls, Fan และ Yada, 2008) นอกจากลักษณะพื้นฐานและโครงสร้างของธัญพืชแล้วกระบวนการตัดแปรต่าง ๆ สามารถเพิ่มปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน เพื่อนำแป้งหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้มาประยุกต์ใช้สำหรับผู้ที่ป่วยเป็นโรคประจำตัวข้างต้นได้ อย่างเช่นงานวิจัยของ Shin, Kim, Ha, Lee และ Moon (2005) ที่ทำการศึกษาการตัดแปรด้วยวิธีการตัดแปรทางกายภาพด้วยความร้อนขึ้นในสตาร์ชมันเทศ พบว่า การให้ความร้อนที่ 50% และความร้อนที่ 55 องศาเซลเซียสให้ปริมาณ SDS สูงกว่าการให้ความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิอื่น ๆ

3.2.3 แป้งทนย่อยต่อเอนไซม์

แป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant Starch) ตามคำนิยามของ European FLAIR-concerted Action (EURESTA) หมายถึง แป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้

ด้วยเอนไซม์และคุณสมบัติภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ปกติได้ resistant starch สามารถเป็นออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ Resistant Starch type I เป็นแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ เนื่องจากถูกตรึงไว้ในเซลล์เม็ดแป้ง เป็น resistant starch ที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติแต่เป็นส่วนน้อย ส่วนใหญ่พบในเมล็ดพืช (grains), เมล็ดพันธุ์ (seeds) และเมล็ดถั่ว (legume) Resistant Starch type II เป็น resistant starch ที่อยู่ในรูปเม็ดแป้งดิบ (native granular starch) พบในแป้งมันฝรั่ง (potato starch) และกล้วยดิบ (green banana) สำหรับ Resistant Starch type III เป็นแป้งที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชัน (recrystallization) ของ amylose (Eerlingen et al., 1995 and Brouns et al., 2002)

จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการผลิต RS ของ Kim, Tanhehco และ Ng (2006) ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันในแป้งสาลีสำหรับทำเพสตรี (pastry wheat flour) พบว่า การทดลองที่ความชื้น 20 และ 40% ไม่มีผลต่อปริมาณ RS ยกเว้นที่ความชื้น 60% ของกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณ RS เนื่องจากเป็นช่วงระดับความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน และผลของความเร็วรอบสกรู (screw speed) พบว่า ไม่มีผลต่อปริมาณ RS แต่เมื่อนำเพสตรีที่ได้เก็บที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณ RS ดังนั้น ความชื้นและเวลาในการเก็บจึงส่งผลต่อการสร้าง RS จากการศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้งบาร์เลย์พันธุ์ CDC-Candle และพันธุ์ Phoenix ของ Faraj และคณะ (2004) พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการแปรรูปที่อุณหภูมิ 90, 100, 120, 140 และ 160 องศาเซลเซียส ความชื้นของวัตถุดิบที่ 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบสกรูที่ 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 Siljiström และคณะ (1986) พบว่า กระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้ปริมาณ RS ลดลงแต่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเส้นใยอาหารในแป้งสาลี Huth, Dongowski, Gebhardt และ Flamme (2000) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของแป้งข้าวบาร์เลย์หลังผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและการเก็บที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า สภาวะของกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 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

3.3 Non-starch polysaccharide

สารโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (Non-starch polysaccharide : NSP) เป็นสารที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยอาหาร NSP จะแบ่งออกเป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ทั้งสองประเภทของ NSP มีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น ใยอาหารที่ละลายน้ำช่วยให้ภาวะกระเพาะว่างช้าลง ช่วยเพิ่มเวลาในการขนส่งในลำไส้ และลดการดูดซึมสารอาหารอื่น (เช่น กลูโคส) ส่วนใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจะทำให้เวลาการขนส่งในลำไส้ลดลงและช่วยทำให้มวลอุจจาระเพิ่มขึ้น เป็นต้น (Russell and Bass, 1985)

เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำโดยทั่วไปจะถูกหมักโดยหมักจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่และส่งผลทำให้เพิ่มการผลิตของกรดไขมันสายสั้น (SCFA) ซึ่งช่วยในการละลายของแร่ธาตุ (Lopez et al., 1999) นอกจากนี้ยังได้รับการพิสูจน์ว่าใยอาหารที่ละลายน้ำไม่มีผลข้างเคียงต่อการดูดซึมแร่ธาตุ (Debon et al., 2001) และยังคงแสดงให้เห็นว่า NSP ที่ละลายน้ำสามารถลดคอเลสเตอรอลและควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด (Spiller, 1993) และจากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของเส้นใยที่ละลายน้ำช่วยลดการคอเลสเตอรอลในเลือดซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพที่เฉพาะเจาะจงสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรค hypercholesterolemia (Kahlon, 2003; Lopez et al., 1999; Al-Othman, Al-Shagrawi, Hewedy, and Hamdi, 1998; Sudheesh, and Vijayalakshmi, 1999; Wang, Onnagawa, Yoshie, and Suzuki, 2001) ในขณะที่ความสามารถนี้จะไม่แสดงในเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ (Carter, Hardman, Heitman, and Cameron, 1998; Anderson and Tietjen-Clark, 1986) ที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพของ NSP ที่ละลายน้ำได้ในธัญพืชเช่น arabinoxylans อะราบิโนไซแลนในรำข้าวโพด (Lopez et al., 1999), β - glucans ในข้าวโอ๊ต (Kalra and Jood, 2000) และข้าวบาเลย์ (Delaney et al., 2003)

β - glucans และอะราบิโนไซแลน เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์ม ซึ่งสามารถแบ่งชนิดตามการละลายได้เป็น สกัดได้ด้วยน้ำ (water-extractable) และสกัดไม่ได้ด้วยน้ำ (water-unextractable) อะราบิโนไซแลน เป็น NSP หลักที่ละลายน้ำได้ในข้าวสาลีและข้าวไรย์ ส่วน β - glucans จะพบในข้าวโอ๊ตและข้าวบาเลย์ (Cui, 2001) อะราบิโนไซแลนถูกสร้างขึ้นจากน้ำตาลเพนโทส (pentose) ที่ชื่อว่า เพนโทแซน (pentosans) ส่วนใหญ่เกิดจากอะราบิโนสและไซโลส ดังนั้นจึงมักจะเรียกว่าอะราบิโนไซแลน (arabinoxylans) (Aman and Westerlund, 1996) แป้งสาลี

ประกอบด้วยทั้งอะราบิโนไซแลนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ปริมาณ 25% และ 75% ตามลำดับ (Gruppen, Marseille, Voragen, Hamer, and Pilnik, 1989) ปริมาณของอะราบิโนไซแลนจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และการเลือกวิธีการสกัด ตัวอย่างเช่น เมื่อนำแป้งสาลีไปสกัดด้วยน้ำเย็น ผลผลิตรวมของ อะราบิโนไซแลนที่ละลายน้ำได้ในข้าวสาลีเป็น 1.0-1.5% (Hoseney, 1986) หลังจากที่ทำเป็นโคและล้างด้วย 0.1 M โซเดียมคลอไรด์ พบว่าระดับของอะราบิโนไซแลนที่ละลายน้ำ เป็น 0.5% ที่มีปริมาณโปรตีนต่ำที่ 0.6% (Hoffmann, Roza, Maat, Kamerling, and Vliegenthart, 1991)

จากการศึกษาของ Dervilly - Pinel และคณะ (2001) ได้ศึกษาการสกัด pearled flours ของข้าวสาลี, ข้าวบาร์เลย์และ triticale ด้วยน้ำอุ่น พบว่า ปริมาณอะราบิโนไซแลนอยู่ในช่วง 0.2-0.7% ในขณะที่ในข้าวไรย์มีปริมาณ 2.1 % และมีรายงานว่าอะราบิโนไซแลนมีผลต่อประสิทธิภาพของโคของแป้งสาลี (Wang, 2003) จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า อะราบิโนไซแลนมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมอบ ตัวอย่างเช่น การกำจัดเพนโทแซนที่ละลายน้ำได้จากแป้งสาลีจะส่งผลให้ปริมาณของก้อนขนมปังลดลง ในขณะที่เติมนอกเหนือจากการละลายน้ำ 2% pentosans endosperm ที่ละลายน้ำได้ จะส่งผลทำให้ปริมาณของก้อนขนมปังเพิ่มขึ้น 30-45% ซึ่งช่วยปรับปรุงให้เนื้อสัมผัสของขนมปังมีความสม่ำเสมอ (Hoseney, 1984)

โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (NSP) จากธัญพืชที่มีพันธะหรือไม่มีพันธะโควาเลนต์ร่วมกับเซลลูโลสและลิกนินในผนังเซลล์พืช NSP สามารถแยกได้โดยน้ำ (Bengtsson and Aman, 1990; Izydorzyk, Macri, and MacGregor, 1998a) และโดยวิธีการสกัดด้วยอัลคาไล (Cui, et al, 1999; Nilsson, et al, 1996) สารสกัดที่ได้แบ่งออกเป็นสองประเภทที่แตกต่างกันคือ สารที่สกัดได้ด้วยน้ำ (waterextractable) และสารที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ (water-unextractable) ตามลำดับ สารสกัดของโพลีแซคคาไรด์เหล่านี้ ขึ้นอยู่กับการรวม conformational ที่พันธะโควาเลนต์ของเอสเตอร์ ระหว่างกรดเพอรูติก และส่วนประกอบอื่นๆ เช่นลิกนิน (Scalbert, Monties, Lallemand, Guittet, and Rolando, 1985) Izydorczyk และคณะ (1998) ได้ศึกษาการสกัด NSP ที่ละลายในน้ำจากข้าวบาร์เลย์ โดยศึกษาการสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า yield ของสารสกัดที่ 40 องศาเซลเซียส และ 65 องศาเซลเซียส คือ 1.4 และ 1.3% (w / w) ตามลำดับ ปริมาณของอะราบิโนไซแลนที่สกัดที่ 40 องศาเซลเซียส คือ 16% ซึ่งสูงกว่าการสกัดที่ 65 องศาเซลเซียส คือ 6% สารสกัดที่ 40 องศาเซลเซียส ประกอบด้วย กลูโคส 82.5% ไซโลส 8.9% และอะราบิโนส 7.0% ในขณะที่สารสกัดที่ 65 องศาเซลเซียส ประกอบด้วย กลูโคส 93.3% ไซโลส 3.3% และอะราบิโนส 2.5% Westerlund และคณะ (1993) ได้ศึกษาขั้นตอนเพื่อให้ได้ β -glucans และอะราบิโนไซแลนจากข้าวโอ๊ตที่ผ่านการสี พบว่า ระดับของกาแลคโตสและกลูโคสมีเพียง

เล็กน้อยในส่วนของวัตถุดิบที่สกัดได้ด้วยน้ำ และเมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบของอะราบิโนไซแลน พบว่ามีอะราบิโนส 27.4% ไซโลส 44.2% เกล็ด 19.8% และโปรตีน 4.8%

การกระจายตัวของโมเลกุลของอะราบิโนไซแลนที่ละลายน้ำจากแปดพันธุ์ข้าวสาลีแปดพันธุ์ที่คำนวณได้จากสมการของ Mark - Houwink อยู่ในช่วง 134,700 ไป 204,600 (Rattan, Izydorczyk, and Billaderis, 1994) ความหนืดอยู่ในช่วง 3.60-5.48 dl/g ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างห่วงโซ่ของแมคโครโมเลกุลเหล่านี้ อะราบิโนไซแลนทั้งหมดจะแสดงการกระจายตัวโมเลกุลค่อนข้างกว้าง โดยดูจากเจลฟิวเทรชันโปรไฟล์ (gel filtration profiles) Dervilly และคณะ (2000) รายงานค่าของโมเลกุล คือ 300,000 และ polydispersity index คือ 1.6 สำหรับอะราบิโนไซแลนที่ละลายน้ำของข้าวสาลี โดยทำการวิเคราะห์ด้วย high performance size exclusion chromatography (SEC) ค่าความหนืด (intrinsic viscosity) คล้ายกับที่พบโดย Rattan และคณะ (1994) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของอะราบิโนไซแลนที่ละลายได้ในแป้งข้าวไรย์มีมาก ที่พบในแป้งสาลี 2-3 เท่า (Meuser and Suckown, 1986) Girhammar และ Nair (1992) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของอะราบิโนไซแลนในข้าวไรย์ โดยใช้utilizing gel permeation chromatography (GPC) มีประมาณ 519,000 ถึง 770,000 เมื่อเทียบกับในข้าวสาลี คืออยู่ในช่วง 219,000 ถึง 255,000 และยังมีรายงานว่าเพนโทแซนที่ละลายน้ำในข้าวไรย์ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงกว่าในข้าวสาลี (Vinkx et al, 1991)

3.4 การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นกระบวนการแปรรูปที่ใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น (high temperature short time) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่างแรงทางกลและความร้อน (วิลโลว์ รังสาตทอง, 2545) โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้รวมหลากหลายการทำงานของหลากหลายส่วนไว้ร่วมกัน ได้แก่ ส่วนที่รับและส่งวัตถุดิบ (feed hopper) เข้าสู่ตัวเครื่อง ส่วนการผสม การนวด การเนียน การให้ความร้อน และการขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านรูเปิดที่หน้าแปลนเพื่อทำให้เกิดรูปร่าง ส่งผลทำให้วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (intermediate product) หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (finished product) ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้นำมาใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด เช่น อาหารพร้อมรับประทานจากธัญชาติ (ready-to-eat cereal) เนื้อเทียม พาสตา และอาหารขบเคี้ยว (snack) เป็นต้น (ประชา บุญญศิริกุล, 2539)

3.4.1 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 Vasanathan และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณใยอาหารของแป้งข้าวบาร์เลย์พันธุ์ CDC-Candle และพันธุ์ Pheonix พบว่า ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้และปริมาณใยอาหารทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นทั้ง 2 พันธุ์หลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันในช่วงอุณหภูมิบารเลที่ 90-140 องศาเซลเซียส และช่วงความชื้นที่ 20-50% โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณใยอาหารที่ละลายได้เกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างจากใยอาหารที่ละลายไม่ได้ไปเป็นใยอาหารที่ละลายได้ในระหว่างกระบวนการแปรรูป สำหรับ ปริมาณใยอาหารที่ละลายไม่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเฉพาะในแป้งข้าวบาร์เลย์พันธุ์ Pheonix เนื่องจากเกิดการสร้าง RS type 3 หรือ retrograded amylose ในระหว่างการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน นอกจากนี้ กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีผลต่อสารต้านโภชนาการ (antinutrient) ด้วย เช่น งานวิจัยของ Alonso, Aguirre และ Marzo (2000) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อสารต้านโภชนาการและคุณสมบัติในด้าน การย่อยของสตาร์ชและโปรตีนในธัญพืชในกลุ่มถั่ว พบว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้คุณสมบัติในด้านการย่อยของสตาร์ชและโปรตีนมีค่าสูงขึ้น แต่มีผลทำให้สารในกลุ่มโพลีฟีนอล (polyphenol) ซึ่งจัดเป็นสารในกลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) และสารยับยั้งต่าง ๆ เช่น สารยับยั้งเอนไซม์ทริปซิน (trypsin inhibitor) สารยับยั้งเอนไซม์โครโมทริปซิน (chrymotrypsin inhibitor) และสารยับยั้งเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α -amylase inhibitor) มีปริมาณลดลง นอกจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางด้านอาหารอื่น ๆ กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านโครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของวัตถุดิบด้วย เช่น งานวิจัยของ Kadan, Bryant และ Pepperman (2003) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งพบว่า คุณสมบัติของแป้งข้าวหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้คุณสมบัติ

ทางด้านความหนืด 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 เมื่ออุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยามลลาร์ด (maillard reaction) ที่เกิดจากการจับกันระหว่างน้ำตาลรีดิวซิงกับกลุ่มอะมิโนอิสระ (free amino group) งานวิจัยของ Ding, Ainsworth, Plunkett, Tucker และ Marson (2006) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงหน้าที่และทางกายภาพของแป้งข้าวสาลีหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ค่า WAI, WSI และอัตราขยายตัว (expansion ratio, ER) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับปัจจัยในด้านการผลิต เช่น ความชื้น อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate) และอุณหภูมิในบารเรล นอกจากนี้ Bhandari, D'Arcy และ Young (2001) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการรักษากลิ่นรสของผลิตภัณฑ์หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่ได้สูญเสียไปเนื่องจากการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารบางอย่างลงไปเพื่อทำหน้าที่จับกับกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า การเติม β -cyclodextrin มีส่วนช่วยไม่ให้สูญเสียกลิ่นรสที่ต้องการได้ งานวิจัยของ Bhatnagar และ Hanna (1994) ทำการศึกษาผลของการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันในสตาร์ชข้าวโพด พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันสามารถทำให้เกิดการจับกันระหว่างอะมิโลสและไขมันที่เติมลงไปมีผลทำให้เกิดลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V-pattern ประสิทธิภาพในการจับกับไอโอดีน (iodine binding capacity) มีค่าลดลง ค่า ER คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ในน้ำ (water soluble carbohydrate) WSI มีค่าลดลงแต่มีผลทำให้ค่าความหนาแน่น (bulk density) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและสตาร์ชข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันแต่ไม่มีการเติมไขมันเพิ่มเติม นอกจากนี้มีการศึกษาผลของการเติมเวย์โปรตีนเข้มข้น (whey protein concentrate) ลงในแป้งข้าว แป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่ง และนำไปผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันทั้งในรูปแบบแรงเฉือนต่ำและแรงเฉือนสูง พบว่า การเติมเวย์โปรตีนมากกว่าร้อยละ 25 มีผลทำให้ลดค่า

พลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy) ของการแปรรูป และส่งผลให้การขยายตัวและค่า WAI ลดลง รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จะมีลักษณะแข็งและกระด้างมากขึ้น (Onwulata, Konstance, Smith และ Holsinger, 1998)



บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุประสงค์

ลูกเด็ยพันธุ์เปลือกขาวจากบริษัท ยงสวัสดิ์พืชผลวังสะพุง จำกัด จังหวัดเลย ลูกเด็ยพันธุ์เปลือกดำจาก บริษัท ซีซีพี นอร์ทเทิร์น จำกัด จังหวัดพะเยา

2. การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเด็ย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ลูกเด็ยพันธุ์เปลือกขาว และเปลือกดำเต็มเมล็ดนำมาบดเป็นแป้ง ด้วยวิธีการบดแบบแห้ง ด้วยเครื่องบดแบบ centrifugal mill (Retsch ZM1000, GmbH and KG, Germany) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตร (mesh No.60)

2.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของลูกเด็ย

วิเคราะห์ความชื้น โปรตีน และเถ้าโดยวิธี AOAC (2000) วิเคราะห์หาปริมาณไขมันโดยใช้เครื่อง 2050 Soxtec Avanti autoextraction unit (Foss Tecator, Sweden) วิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber) โดยใช้ชุด Total dietary fiber assay kit ของ Sigma-Aldrich ตามหลักการวิธี AOAC (1997) วิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชโดยวิธีดัดแปลงจาก Wood, Weisz, and Blackwell (1991)

3. การสกัดและคุณสมบัติของสตาร์ชลูกเด็ย

3.1 การสกัดสตาร์ชลูกเด็ยจากแป้งลูกเด็ย

การสกัดสตาร์ชลูกเด็ยทำตามวิธีการของ Puchongkavarin, Varavinit และ Bergthaller (2005) โดยนำแป้งที่ผ่านการสกัดไขมันออกแล้วออกแช่ในน้ำกลั่นในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำกลั่น (1:2) จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 10% โดยปริมาตรเพื่อปรับความเป็นกรดและด่าง (pH) เป็น 5 และนำสารละลายแป้งที่ปรับความเป็นกรดและด่างแล้วปรับอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเอนไซม์ cellulase ที่มีกิจกรรม 700 EGU/g ปริมาณ 0.2% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งแห้ง และกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับสารละลายแป้งให้มีความเป็นกรดและด่างเป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.8% โดยน้ำหนักและนำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 4275xg เป็นเวลา 5 นาที

จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนตะกอนที่ได้ในอัตราส่วนแป้งต่อน้ำกลั่น (1:2) และปรับอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเอนไซม์ alkaline protease (alcalase) ที่มี activity 2.4 AU/g ปริมาณ 0.4% ปริมาตรต่อน้ำหนักแป้งแห้งและกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 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)

3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชลูกเดี๋ย

3.2.1 กำลังการพองตัวและการละลาย

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

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

3.2.2 คุณสมบัติการเกิดเพสท์

วิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสท์ (pasting properties) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA, Newport Scientific, Warriewood, Australia) ตามวิธีการของ Li และ Corke (1999) ซึ่งตัวอย่างจำนวน 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงใน RVA canister และ

เติมน้ำกลั่นลงใน 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 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่างนาที่ที่ 1-8.5 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียสในช่วงเวลาระหว่างนาที่ที่ 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)

3.2.3 อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในซซ์ของเม็ดแป้ง

ศึกษาคุณสมบัติทางด้านความร้อน (thermal properties) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Colorimetry (DSC 7, Perkin Elmer Corporation, U.S.A.) ซึ่งตัวอย่าง 10 มิลลิกรัมลงในถ้วยสแตนเลส (stainless steel pan) และเติมน้ำกลั่นลงไปในส่วนน้ำหนักแป้ง 30% จากนั้นปิดฝาให้สนิทและบ่มที่อุณหภูมิห้องข้ามคืน จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันด้วย DSC โดยใช้ indium เป็น standard และถ้วยสแตนเลสเปล่าเป็น reference และใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ 25 ถึง 125 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดลง 60 องศาเซลเซียสต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยทำการตรวจวัดเช่นเดียวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชัน ทำการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิที่ของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_o$) และค่าพลังงานเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม pyris manager (Perkin-Elmer, Norwalk, U.S.A.)

3.2.4 วิเคราะห์ปริมาณผลึกและลักษณะของผลึกเม็ดแป้ง

วิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) (Bruker D5005, Bruker GmbH, Germany) ด้วยรังสี $\text{Cu K}\alpha$ 1.54 Å และใน

การทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม Bragg's angle (2θ) เท่ากับ 4-30 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 รอบต่อนาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity) ตามวิธีการของ Hermans และ Weidinger (1961) วัดพื้นที่พีคโดยใช้โปรแกรม EVA diffact plus#1 software (Bruker GmbH, Germany) ซึ่งอัตราส่วนของพื้นที่พีคต่อพื้นที่ทั้งหมดคิดเป็นค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity)

3.2.5 วิเคราะห์โครงสร้างของเม็ดแป้ง

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

3.2.6 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 มิลลิลิตรต่อ นาที โดยเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ประกอบด้วย eluent A คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ และ eluent B คือ โซเดียมอะซิเตรทเข้มข้น 500 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ควบคุมให้มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เป็นองค์ประกอบในเฟสคงที่ ดังนี้ นาทีที่ 0 ถึง 10 มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง

40% นาที่ที่ 10 ถึง 20 มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 50% และนาที่ที่ 20 ถึง 55 มีร้อยละสัดส่วนของ eluent B เพิ่มขึ้นจาก 50 ถึง 70% และเทียบปริมาณคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลต่ำกับกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส (glucose) มอลโทส (maltose) มอลโทไตรโอส (maltotriose) มอลโทเตตระโอส (maltotetraose) มอลโทเพนตะโอส (maltopentaose) มอลโทเฮกตะโอส (maltohexose) และมอลโทเฮปตะโอส (maltoheptaose) (Fluka Chemical Crop, St. Ronkonkoma, NY, U.S.A.)

4. การสกัดและวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของ non-starch polysaccharide

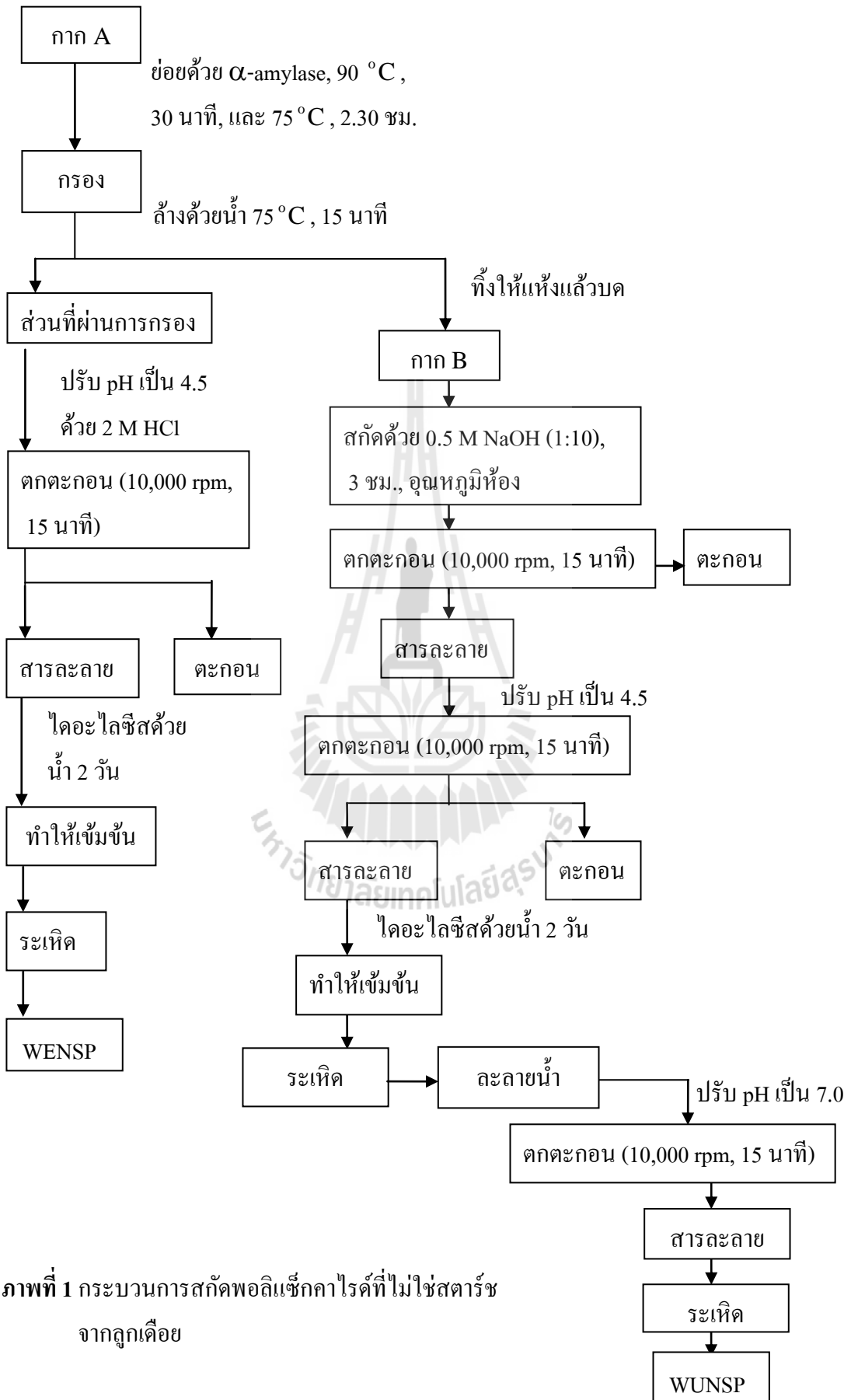
4.1 การเตรียมตัวอย่าง

คัดแยกเอาเปลือกและสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ที่ปนมาออกจากเมล็ด นำเมล็ดมาบดและผ่านตะแกรงร่อนขนาด 35-mesh แล้วนำมาผ่านการกลั่นไหลกลับ (Reflux) ของเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70 ในอัตราส่วน 1:10 กรองเอาสารละลายเอทานอลออก นำกากที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส บดและผ่านตะแกรงขนาด 35-mesh อีกครั้ง กากที่ได้นี้เรียกว่า กาก A

4.2 การสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชจากลูกเดือย (Non-starch polysaccharides)

นำกาก A มาสกัดด้วยน้ำและย่อยเอาสตาร์ชออกโดยใช้แอลฟาอะไมเลส ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที สกัดและย่อยต่อที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 2.30 ชม. (ภาพที่ 1) กรองสารละลายออกนำกากที่ได้มาล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และล้างด้วยเอทานอลร้อยละ 100 อีกครั้งหนึ่ง เรียกกากที่ได้นี้ว่า กาก B ให้ความร้อนสารละลายที่กรองได้ที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อทำลายเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส จากนั้นปรับสารละลายที่ได้ให้ค่า pH 4.5 เพื่อตกตะกอนโปรตีน ด้วยสารละลาย 2 M HCl นำไปเหวี่ยงแยกตะกอนที่ 10,000 rpm นาน 15 นาที นำส่วนที่เป็นสารละลายใส (Supernatant) ไปไดอะไลซิส (Dialysis) ด้วยน้ำบริสุทธิ์เป็นระยะเวลา 2 วัน จากนั้นระเหยเอาน้ำในสารละลายออกโดยใช้เครื่อง Vacuum rotary evaporater ให้เหลือสารละลายประมาณ 1/4 ของปริมาตรเริ่มต้น นำสารละลายไปอบแห้งแบบระเหิด (Freeze-dried) ตัวอย่างที่ได้นี้เรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชที่ละลายได้ในน้ำ (WENSP)

นำกาก B มาสกัดด้วยสารละลาย 0.5 NaOH ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) นาน 3 ชม. (Cui, Wood, Weisz, and Beer, 1999) แล้วเหวี่ยงแยกตะกอนที่ 10,000 rpm นาน 15 นาที ปรับสารละลายที่ได้ให้ค่า pH 4.5 นำมาเหวี่ยงแยกตะกอนเอาส่วนที่เป็นสารละลายไปไดอะไลซิสเป็นระยะเวลา 2 วัน ระเหยเอาน้ำในสารละลายออกให้เหลือสารละลายประมาณ 1/4 ของปริมาตร



ภาพที่ 1 กระบวนการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช จากลูกเดือย

เริ่มต้น แล้วนำสารละลายไปอบแห้งแบบระเหิด นำตัวอย่างที่แห้งแล้วมาละลายน้ำปรับให้ได้ pH 7 เหยี่ยงแยกตะกอนอีกครั้ง นำสารละลายอบแห้งแบบระเหิด ตัวอย่างที่ได้นี้เรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชที่ไม่ละลายในน้ำ (WUNSP)

4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ non-starch polysaccharide

4.3.1 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีจาก Dubois, Gilles, Hamilton, Rebers, and Smith (1956)

4.3.2 การวิเคราะห์กรดยูโรนิก (Uronic acid) และกรดอะมิโน

วิเคราะห์ปริมาณกรดยูโรนิกตามวิธีของ Blumenkrantz and Asboe-Hansen (1973) โดยการละลายตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 3 ชม. เจือจางสารละลายตัวอย่างให้อยู่ในช่วงของสารละลายมาตรฐานกรดกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) เติมสารละลาย 12.5 mM Tetraborate ใน H_2SO_4 เข้มข้น ลงในตัวอย่างที่เจือจางรวมทั้งสารละลายมาตรฐาน ผสมให้เข้ากันแล้วแช่ไว้ในน้ำแข็งให้เย็นตัวลงทันที จากนั้นให้ความร้อนสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานทั้งหมดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที แล้วแช่ในน้ำแข็งให้สารละลายเย็นตัวลง เติมสารละลาย 0.15% m-Hydroxydiphenyl เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 20 นาที ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (Varian Cary 3C) ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

4.3.3 วิเคราะห์ชนิดของมอโนแซ็กคาไรด์

นำตัวอย่างมาย่อยด้วยสารละลาย 1 M H_2SO_4 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 2 ชม. แล้วเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์ กรองตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง (0.45 μ m) แยกชนิดและปริมาณของมอโนแซ็กคาไรด์โดยฉีดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 50 ไมโครลิตร ในเครื่อง High Performance Anion Exchange Chromatography (HPAEC) ยี่ห้อ DIONEX แยกโดยใช้คอลัมน์ CaboPac PA1 ที่เชื่อมต่อกับเครื่องตรวจวัดชนิด PAD (Pulsed amperometric detector) ตามวิธีของ Wood, Weisz, and Blackwell (1994) ใช้สารละลาย 100 mM NaOH และน้ำบริสุทธิ์ เป็นตัวชะสาร (Eluent solution) ในอัตราส่วน 8/92 ถึง 0/100 ตามวิธี Gradient elution ที่อัตราการความเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที ล้างคอลัมน์โดยใช้สารละลาย 300 mM NaOH นาน 15 นาที ทุกครั้งก่อน

ทดสอบตัวอย่างใหม่ เปรียบเทียบชนิดและปริมาณของมโนแซ็กคาไรด์โดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมโนแซ็กคาไรด์ ได้แก่ แรมโนส อะราบิโนส กาแลกโตส กลูโคส ไซโลส และแมนโนส

4.3.4 วิเคราะห์ชนิดของแร่ธาตุ

วิเคราะห์ชนิดของแร่ธาตุในตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) วิเคราะห์ชนิดของกรดอะมิโนโดยวิธี AOAC 994.12 AA in Feeds และ AOAC 985.28 Sulphur AA in Food and Feed Ingredient โดยห้องวิเคราะห์ทางเคมีของ University of Guelph, Canada

5. การวิเคราะห์การกระจายตัวของโมเลกุล (molecular distribution) และโครงสร้างของสาร non-starch polysaccharide

5.1 การกระจายขนาดโมเลกุล (Molecular size distribution)

วิเคราะห์การกระจายขนาดโมเลกุลตามวิธีของ Wang, Wood, Huang, and Cui (2003) โดยใช้เครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC) ที่มีเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด คือ Refractive index, Right angle laser light scattering (RALLS) และ Viscosity (Model Dual 250, Viscotek, Houston, USA) ใช้คอลัมน์ 2 ชนิดคือ Shodex OHpak SB-806M HQ, Showa Denko K.K., Tokyo, Japan และ Ultrahydrogel linear, Waters, Milford, USA ในการแยกสาร โดยควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้ 100 mM sodium nitrate (NaNO_3) ที่อัตราการความเร็ว 0.6 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นตัวชะสาร เทียบมาตรฐานคอลัมน์ (Column calibration) โดยใช้สารละลายมาตรฐาน Pullulans 100, 400 และ 800 ใช้ค่า Specific refractive index increment (dn/dc) 0.146 และ 0.190 มิลลิลิตรต่อกรัม เป็นค่าแฟกเตอร์ ในการคำนวณขนาดโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช เตรียมสารตัวอย่างโดยนำมาละลายน้ำให้มีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 3 ชม. กรองสารละลายตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง ($0.45 \mu\text{m}$) แยกขนาดโมเลกุลสารโดยฉีดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 100 ไมโครลิตร ในเครื่อง HPSEC

วิเคราะห์แยกส่วน (Fraction) ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง HPSEC ที่มีเครื่องตรวจวัด 3 ชนิดคือ Multi angle laser light scattering (MALLS), Refractive index และ Ultraviolet แยกส่วนระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน โดยฉีดสารละลายตัวอย่างเข้าเครื่อง HPSEC ที่มีคอลัมน์ Biosep 4,000 (Phenomenex) ใช้สารละลาย 100 mM NaNO_3 (pH 7) เป็นตัวชะสาร ที่อัตราการความเร็ว 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

5.2 วิเคราะห์ค่า dn/dc

วัดค่า dn/dc โดยเครื่อง BI-DNDC differential refractometer (Brookhaven) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร เตรียมตัวอย่างโดยนำมาละลายในสารละลาย 100 mM sodium nitrate (NaNO_3) ให้ได้ความเข้มข้นระหว่าง 2.0-0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร วัดค่า dn/dc โดยการวัดค่าความชันของกราฟระหว่างค่า Refractive index และตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ (2.0-0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร)

5.3 วิเคราะห์ค่า Intrinsic viscosity

ละลายตัวอย่างในน้ำ วัดค่า Intrinsic viscosity โดยใช้ Glass capillary viscometer (Ubbelohde viscometer ขนาด 50 มิลลิลิตร, USA) ที่อุณหภูมิ 23 ± 0.05 องศาเซลเซียส สร้างกราฟระหว่างค่า Relative viscosity และ Specific viscosity คำนวณค่า Intrinsic viscosity ตามวิธีการของ Huggins (1942) และ Kraemer (1938) วัดผลของตัวทำละลายไอออนที่มีต่อประจุของพอลิแซ็กคาไรด์โดยใช้ 0.05 M NaCl เป็นตัวละลายตัวอย่างแทนน้ำ

5.4 การย่อยด้วยเอนไซม์

ย่อยโปรตีนในตัวอย่างออกโดยนำตัวอย่างมาละลายในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.5) เติมโปรติเอส บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 16 ชม. จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เพื่อทำลายโปรติเอส นำสารละลายตัวอย่างเหวี่ยงตกตะกอนที่ 10,000 rpm นำสารละลายส่วนใสมาไลซิสด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป็นระยะเวลา 2 วัน แล้วนำมาอบให้แห้งโดยวิธีอบแห้งแบบระเหิด

5.5 การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชัน (Methylation) และ GC-MS

การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชัน โดยใช้วิธีดัดแปลงจาก Ciucanu and Kerek (1984) นำตัวอย่างที่บริสุทธิ์มาอบในเครื่องอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง แล้วเก็บในตู้ดูดความชื้นแบบสูญญากาศ นำตัวอย่างประมาณ 2-3 มิลลิกรัม มาเติม Dimethyl sulfoxide (DMSO) จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ภายใต้อากาศไนโตรเจน ละลายสารตัวอย่างโดยการกวนให้ละลายเข้าด้วยกันด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการละลาย โดยใช้เครื่องสั่นสะเทือนความถี่สูง (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เติมผงโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แห้งสนิทประมาณ 20 มิลลิกรัม กวนสารให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตามด้วย Methyl iodide จำนวน 0.3 มิลลิลิตร แล้วกวนสารต่อไปอีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในขั้นตอนนี้จะได้

ตัวอย่างที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ถูก Methylation จากนั้นเติม Methylene chloride จำนวน 3-5 มิลลิลิตร นำตัวอย่างมาเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์เพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินออก แล้วแยกส่วนเอาชั้นของน้ำออกไป นำอีกส่วนที่แยกได้มาผ่านคอลัมน์ที่บรรจุ Anhydrous sodium sulphate แล้วนำส่วนที่ผ่านการกรองมาทำให้แห้งโดยการใช้ก๊าซไนโตรเจน แล้วเติม 4 M Trifluoroacetic acid (TFA) จำนวน 0.3 มิลลิลิตรเพื่อไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วระเหยเอา TFA ออกโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน นำตัวอย่างมาละลายในน้ำจำนวน 3 มิลลิลิตร และร้อยละ 1 NH_4OH จำนวน 1 หยด แล้วเติม Sodium borodeuteride จำนวน 1-5 มิลลิลิตร แล้วกวนสารต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จากนั้นเติม Glacial acetic acid ลงไปที่ละหยด แล้วเติมร้อยละ 5 Acetic acid-methanol จำนวน 5 มิลลิลิตร แล้วระเหยออกโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน แล้วตามด้วยร้อยละ 100 Methanol ทำซ้ำกันหลายครั้งจนแน่ใจว่าไม่มี Borate หลงเหลืออยู่ นำตัวอย่างมาเติม Acetic anhydride จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้ตัวอย่างแห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ตัวอย่างที่ได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า Partially methylated alditol acetate (PMAA) เติม Methylene chloride จำนวน 0.5 มิลลิลิตร เพื่อละลายสารตัวอย่าง แล้วนำมาผ่านคอลัมน์ที่บรรจุ Anhydrous sodium sulphate นำสารละลายที่ผ่านการกรองจำนวน 1 ไมโครลิตร ฉีดเข้าไปในเครื่อง GC-MS (ThermoQuest Finnigan, San Diego, CA) ผ่านคอลัมน์ SP-2330 (Supelco, Bellefonte, PA) ที่บรรจุ fused silica capillary (30 m X 0.25 mm, 0.2 μm film thickness) และต่อเข้ากับเครื่องตรวจวัด MS ใช้ก๊าซฮีเลียมอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นตัวพาเพื่อแยกสาร เพิ่มอุณหภูมิเป็น 160-210 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเร็ว 2 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 240 องศาเซลเซียส ที่อัตราความเร็ว 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

5.6 การวิเคราะห์ทาง NMR

โดยนำตัวอย่างบริสุทธิ์มาละลายใน D_2O และอบแห้งแบบระเหิด ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง โดยใช้ตัวอย่างร้อยละ 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) แล้วทดสอบโดยใช้ ^1H NMR and ^{13}C NMR spectra ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องรุ่น Bruker AMX-500 FT spectrometer ที่ Frequency pulse angle 45° ใช้ Tetramethylsilane (TMS) เป็นสารอ้างอิงภายใน (Internal reference) และวิเคราะห์โดยใช้ NMR แบบ 2 มิติ (Two-dimensional NMR) ชนิด HMQC, COSY, TOCSY, และ HMBC แบบ Standard Bruker pulse sequence

6. การแปรรูปแป้งลูกเดี๋ยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion)

6.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำลูกเดี๋ยสายพันธุ์ขาวเต็มเมล็ดมาบดเป็นแป้งด้วยวิธีการบดแบบแห้ง โดยใช้เครื่องบดแบบ ฆ้อน (hammer mill, บริษัท รุ่งเรืองการช่าง จำกัด, ประเทศไทย) จากนั้นนำแป้งที่ได้ร่อนผ่าน ตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตร (mesh No. 60)

6.2 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) ที่มีรูขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ผ่านทางถังใส่วัตถุดิบที่ได้ถังมี เกลียวสกรูคู่เป็นตัวป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron International, Piman, NJ, U.S.A.) โดย ทำการศึกษาความชื้นของแป้งลูกเดี๋ยที่ความชื้น 20, 35 และ 50% โพรไฟล์อุณหภูมิของบาร์เรล 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 หลังจากที่มีการ ปรับเปลี่ยนสถานะและเมื่อค่าแรงทอร์คคงที่ เก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูเดต นำเข้าอบในตู้อบด้วยความ ร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 21 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเพื่อรอการวิเคราะห์

6.3 การวิเคราะห์ปริมาณ RDS, SDS และ RS

การวิเคราะห์ปริมาณ RDS, SDS และ RS วิเคราะห์ตามวิธีการของ Englyst และคณะ (1992) โดยชั่งตัวอย่างหนัก 400 มิลลิกรัม และกัวกัมหนัก 50 มิลลิกรัมลงในหลอดเซนทริฟิวขนาด 85 มิลลิลิตรที่มีลูกแก้วขนาด 1.5 เซนติเมตรจำนวน 5 ลูก จากนั้นเติม 0.1 โมลาร์ สารละลาย บัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท (pH 5.2) จำนวน 20 มิลลิลิตร แล้วนำหลอดเซนทริฟิวแช่ในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสนานเป็นเวลา 45 นาทีพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Julabo EC, Julabo Labortechnik GMBH, Germany) จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ผสมของ porcine pancrease และ amyloglucosidase ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เมื่อครบเวลาที่ 20 และ 120 นาที ปิด

สารละลายตัวอย่างปริมาตร 0.4 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทรีฟิวที่มีสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และให้นิยามเป็นส่วน G20 และ G120 ตามลำดับ หลังจากครบ เวลา 120 นาที นำหลอดเซนทรีฟิวจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส มาแช่ลงใน อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาแช่ในน้ำแข็งเป็นเวลา 20 นาทีและเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 7 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสม ให้เข้ากัน และนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่บรรจุน้ำแข็งเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเปิด ตัวอย่างปริมาตร 0.2 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทรีฟิวที่มีสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมสารละลายเอนไซม์ amyloglucosidase (50 AGU/มิลลิลิตร) ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีพร้อมกับเขย่าอย่างต่อเนื่อง จากนั้นเมื่อครบเวลาย้ายหลอดเซนทรีฟิวไปวางในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำให้เย็นและเติมสารละลาย เอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 12 มิลลิลิตร ให้นิยามส่วนนี้ว่า TG (total glucose) สุดท้ายนำส่วน G20 G120 และ TG มาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทรีฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ ความเร็ว 3000xg เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หักกลูโคสด้วยสารละลายเอนไซม์ PGO วัดค่า การดูดกลืนแสงที่ 440 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) คำนวณปริมาณ RDS SDS และ RS ตามสูตรข้างล่าง

$$RDS = G20 \times 0.9$$

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

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

6.4 การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

วิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (degree of gelatinization, DG) ตามวิธีการของ Chiang และ Johnson (1977) เตรียมตัวอย่างที่เกิดเจลลาทีโนเซชันอย่างสมบูรณ์ (totally gelatinization sample) โดยนำสารละลายแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปที่มีความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก เข้าเครื่อง ออโตคลอป (autoclave, HA-300MN, Hirayama, Japan) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเติมสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลายแป้งที่ได้ ปริมาตร 3 เท่าของสารละลาย แป้งทั้งหมด ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสมที่ความเร็วสูง และทำการกรองสารละลายแป้งและทำการ ล้างซ้ำอีก 2 ครั้งด้วยสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำให้แห้งในตู้ดูดความชื้น บดตัวอย่างและ ร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาด mesh No.80 และเรียกตัวอย่างที่ได้ชื่อว่า “totally gelatinization sample”

ซึ่งตัวอย่างแป้งที่ผ่านการให้ความร้อน 20 มิลลิกรัมลงในหลอดเซนทรีฟิวขนาด 50 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร สำหรับตัวอย่าง totally gelatinization ซึ่งตัวอย่าง totally gelatinization หนัก 20 มิลลิกรัมและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร สารละลายไซโตียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 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 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทรีฟิวที่มีตัวอย่างแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนและตัวอย่าง totally gelatinization จากนั้นนำไปบ่มที่อ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียสพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Julabo EC, Julabo Labortechnik GMBH, Germany) เป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลาที่ 30 และ 60 นาที ปิดสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตรลงในหลอดเซนทรีฟิวที่มีกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid) เข้มข้น 25% โดยปริมาตร ปริมาณ 0.4 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทรีฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 12500xg เป็นเวลา 5 นาทีและเปิดสารละลายส่วนใส 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 ตามสูตร

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

A = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง total gelatinization

B = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 30 นาที

C = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่ผ่านการย่อย 60 นาที

k = ค่าการดูดกลืนแสงของ 1% of intact sample ที่ผ่านการย่อย 30 นาที

Y = ระดับการเกิดเจลาทิไนซ์ของตัวอย่าง (%)

6.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

6.5.1 คุณสมบัติการเกิดเพสต์

วิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสต์ (pasting properties) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว rapid visco analyzer (RVA, Newport Scientific, Warriewood, Australia) ซึ่งตัวอย่างจำนวน 2.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงใน RVA canister และเติมน้ำกลั่นลงใน RVA canister ให้มี

น้ำหนักรวมทั้งหมดเป็น 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 รอบต่อนาที ตลอดการวิเคราะห์ 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)

6.5.2 ดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

วิเคราะห์ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) และค่าดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) ตามวิธีการของ Anderson (1999) ซึ่งตัวอย่างแป้ง 1.25 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงในหลอดเซนทริฟิวขนาด 50 มิลลิลิตรและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียสพร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่อง (Ratex SWB20, Instruments PTY., LTD., Australia) เป็นเวลา 30 นาที ครบเวลานำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนทริฟิว (centrifuge, Hettich, Universal 16 R, Germany) ที่ความเร็ว 3000xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นแยกส่วนใสใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนักและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและคำนวณเป็นร้อยละของค่า WSI และนำตัวอย่างแป้งที่เหลือในหลอดเซนทริฟิวมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณเป็นร้อยละของค่า WAI ซึ่งสามารถคำนวณตามสูตรข้างล่าง

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

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

6.5.3 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) (Bruker D5005, Bruker GmbH, Germany) ด้วยรังสี Cu K α 1.54 Å และในการทดสอบกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมป์ โดยใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม Bragg's angle (2 θ) เท่ากับ 4-30 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 รอบต่อวินาที และคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึก (%relative crystallinity) ตามวิธีการของ Hermans และ Weidinger (1961) วัดพื้นที่พีคโดยใช้โปรแกรม EVA diffract plus#1 software (Bruker GmbH, Germany) ซึ่งอัตราส่วนของพื้นที่พีคต่อพื้นที่ทั้งหมดคิดเป็นค่าร้อยละความเป็นผลึก (% relative crystallinity)

6.6 การวิเคราะห์ antioxidant properties

6.6.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ antioxidant properties

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

6.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการของ Marinova และคณะ (2005) ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 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% โดย

ปริมาตร 2 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรเป็น 5 มิลลิลิตร หลังจากปรับปริมาตรแล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 90 นาที เมื่อครบเวลานำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) เทียบกับสารมาตรฐานกรดแกลลิก (gallic acid) (ในช่วงความเข้มข้นที่ 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร)

6.6.3 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 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 4.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีในความมืด จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libras22, Biochrom, Ltd., Cambridge, England) เทียบกับ blank (DI water) และ control (เมทิลแอลกอฮอล์) คำนวณปริมาณ DPPH radical scavenging activity ตามสูตรดังนี้

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

ΔA_{517} = ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างหรือ control กับ blank ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร

6.6.4 การวิเคราะห์ reducing power

reducing power วิเคราะห์ตามวิธีการของ Choi และคณะ (2007) โดยปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4.3.8.1. ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตทเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ (pH 6.6) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรและสารละลายโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 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 มิลลิลิตรกับสารละลายเฟอริกคลอไรด์เข้มข้น 0.1% โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันและวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

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

6.7 การวิเคราะห์ปริมาณ Coixenolide

ปริมาณ coixenolide วิเคราะห์ตามวิธีการของ Yang และคณะ (2004) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณ 2,3-butanediol ที่ได้จากการปลดปล่อยจาก coixenolide ด้วยวิธีการ acid-catalyzed transesterification นำตัวอย่างแบ่งมาสกัดไขมันออกด้วยสารละลายไดเอทิลอีเทอร์ตามวิธีการของ AOAC (2000) จากนั้นซึ่งไขมันที่ได้จากการสกัดน้ำหนัก 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 จากนั้นนำสารละลายที่ได้หลังจากการปรับให้เป็นกลางแล้วมากรองส่วนของเกล็ดที่เกิดขึ้น 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 μ 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 องศาเซลเซียส ต่อนาที และคงไว้นาน 20 นาที รวมระยะเวลาในการวิเคราะห์เท่ากับ 52 นาที อุณหภูมิของอุปกรณ์ตรวจวัด (detector temperature) เป็น 250 องศาเซลเซียส ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (injection volume) คือ 1 ไมโครลิตร จากนั้นคำนวณปริมาณ coixenolide ได้จากการวิเคราะห์ ปริมาณ 2,3-butanediol โดยคำนวณเทียบกับพื้นที่พีคของ internal standard

6.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การศึกษาสภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ใช้แผนการทดลองแบบ factorial experiment แบบ completely randomized design (CRD) โดยศึกษาตัวแปรของสภาวะการแปรรูป

2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิของบารเลต และความชื้นของวัตถุดิบ โดยแต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ อุณหภูมิของบารเลตเป็นระดับต่ำ (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%



บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ย

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำแบบเต็มเมล็ด (whole grain flour) แสดงในตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณ โปรตีน ไขมัน โยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber, TDF) ของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดพันธุ์ดำมีปริมาณมากกว่าพันธุ์ขาว ในขณะที่ปริมาณเถ้าของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดพันธุ์ขาวมีปริมาณมากกว่าพันธุ์ดำ โดยแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดพันธุ์ดำมีปริมาณ โปรตีน 16.13% ไขมัน 5.63% และ เถ้า 1.39% และพันธุ์ขาวมีปริมาณโปรตีน 13.57% ไขมัน 5.18% และเถ้า 1.72 % ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกับการศึกษาของ Wu, Charles และ Huang (2007) ที่รายงานว่า ลูกเดี๋ยจากประเทศไทย ลาว เวียดนามและไต้หวันมีปริมาณโปรตีน 12-14% ไขมัน 6.2-7.2% และเถ้า 1.7-2.4% และการศึกษาของทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล (2530) ที่รายงานว่า ลูกเดี๋ยมีปริมาณโปรตีน 15% ไขมัน 5.5% และ เถ้า 1.53% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยกับธัญพืชอื่น 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, Rucken bauer และ Berghofer, 2004; Silva และ Ciocca, 2005; Hasjim, Srichuwong, Scott และ Jane, 2009) จะเห็นได้ว่า ลูกเดี๋ยมีปริมาณโปรตีน เถ้าและ TDF ใกล้เคียงกับข้าวโพด ข้าวสาลีและข้าว บาร์เลย์ สำหรับปริมาณไขมันในลูกเดี๋ยมีปริมาณใกล้เคียงกับข้าวบาร์เลย์และข้าวโพด

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งลูกเดี๋ยเต็มเมล็ดในพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ

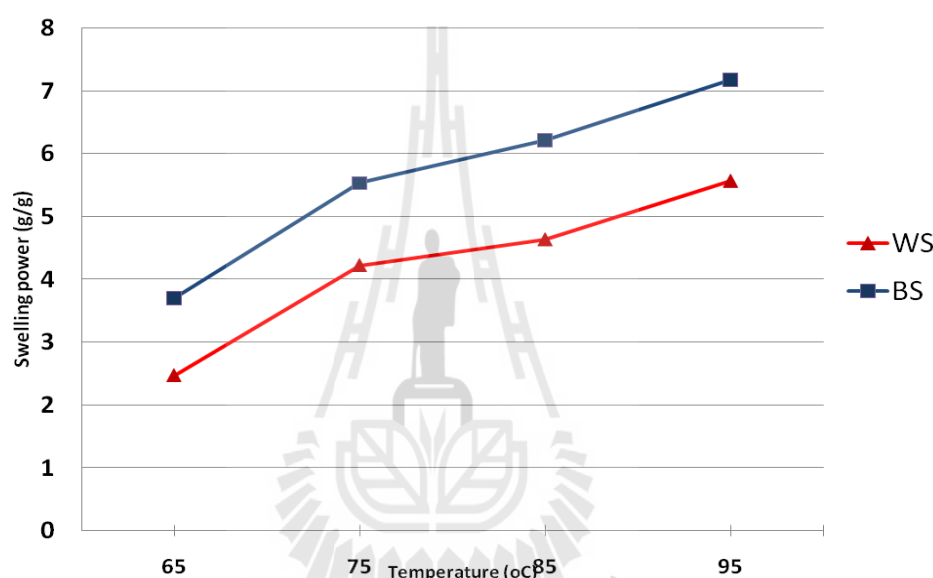
องค์ประกอบ	ลูกเดี๋ยพันธุ์ขาว	ลูกเดี๋ยพันธุ์ดำ
ความชื้น (%)	8.68 ± 0.88	8.35 ± 1.77
โปรตีน (%)	13.57 ± 0.04	16.13 ± 1.03
ไขมัน (%)	5.18 ± 0.45	5.63 ± 0.39
เถ้า (%)	1.72 ± 0.03	1.39 ± 0.30
สตาร์ช (%)	69.64 ± 0.09	66.54 ± 1.36
โยอาหารทั้งหมด (%)	14.7 ± 1.45	17.4 ± 1.96

2. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของสตาร์ชลูกเดือย

2.1 กำลังการพองตัวและการละลาย

กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำที่ช่วงอุณหภูมิ 65 - 95 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 2 พบว่า กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังการพองตัวเมื่ออุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากงานวิจัยของทัศนีย์ พรกิจประสาน และ อรอนงค์ นัยวิกุล (2530) ได้อธิบายไว้ว่า การพองตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โดยส่วนอสัณฐานเป็นบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชอย่างไม่เป็นระเบียบด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบอ่อน ๆ จึงถูกทำลายได้ง่ายและทำให้เกิดการพองตัวในช่วงแรก และส่วนผลึกเป็นบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชอย่างหนาแน่นด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงและจะถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการพองตัวในช่วงที่ 2 การที่กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าน้อยกว่าลูกเดือยพันธุ์ดำ เนื่องจากสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณอะไมโลสน้อยกว่าลูกเดือยพันธุ์ดำ ซึ่งปริมาณของอะไมโลสหรืออัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินรวมถึงโครงสร้างของอะไมโลเพคตินด้วยมีผลต่อกำลังการพองตัว โดยสตาร์ชที่มีปริมาณของอะไมโลเพคตินสูงหรือมีปริมาณอะไมโลสต่ำมีผลให้สตาร์ชสามารถพองตัวได้สูง ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่มีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมากมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งไม่แข็งแรง เนื่องจากไม่สามารถจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นได้ จากเหตุผลนี้เป็นเหตุให้สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจึงสามารถพองตัวได้ดีกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนเกี่ยวกับผลของอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินของ Tester และ Morrison (1990) ได้รายงานไว้ว่า สตาร์ชข้าวบาร์เลย์พันธุ์ข้าวเหนียว และสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ชข้าวบาร์เลย์พันธุ์ข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่า แต่ผลการทดลองของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำที่ได้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Tester และ Morrison (1990) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังการพองตัวอาจไม่ได้เป็นผลมาจากผลของปริมาณอะไมโลสเพียงอย่างเดียว แต่อาจมีผลเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณผลึก โดยสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณผลึกสูงกว่าพันธุ์ดำทำให้ส่วนอสัณฐานของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีปริมาณที่สูงกว่า จึงทำให้น้ำสามารถที่จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้มากกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว ซึ่งมีผลให้สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำสามารถที่จะพองตัวได้สูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (4.63 กรัม

ต่อกรัม) และค่า (6.21 กรัมต่อกรัม) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ 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 ทั้งนี้ความแตกต่างของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเด็ยที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณอะไมโลสและพันธู์ของลูกเด็ย โดยสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 5 พันธุ์ จากงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) มีปริมาณอะไมโลสในช่วง 15.9-25.8% ในขณะที่สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำมีปริมาณอะไมโลส 10.34 และ 17.01%

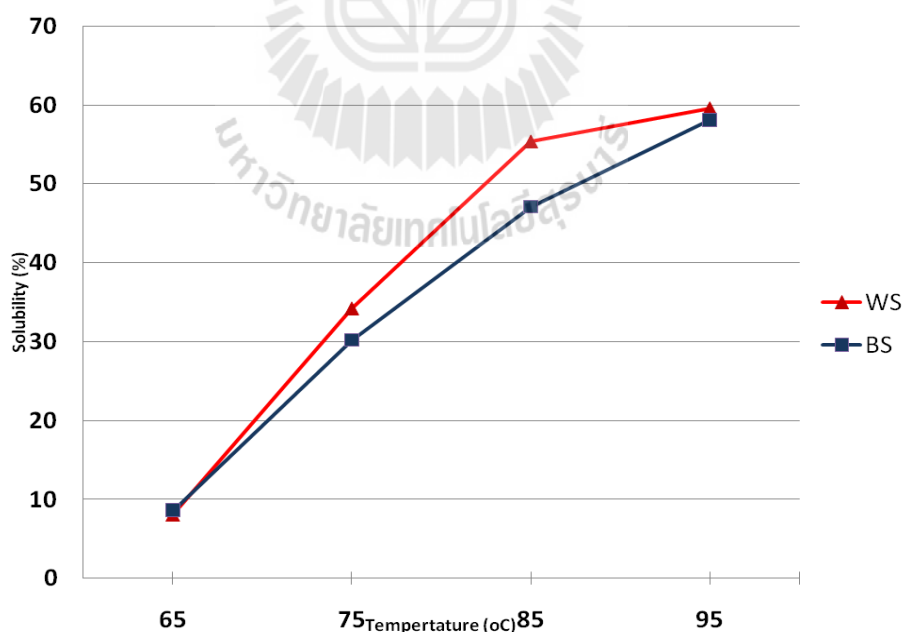


ภาพที่ 2 กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ

WS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ

นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเด็ยกับสตาร์ชอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Simi และ Abraham (2008) พบว่า รูปแบบของกำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวและสตาร์ชลูกเด็ยมีลักษณะเหมือนกัน คือ กำลังการพองตัวของสตาร์ชมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบรูปแบบของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเด็ยกับสตาร์ชมันฝรั่ง จากงานวิจัยของ Osundahunsi, Fagbemi, Kesselman และ Shimoni (2003) พบว่า รูปแบบของกำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเด็ยและสตาร์ชมันฝรั่งมีลักษณะเหมือนกันเช่นกัน แต่กำลังการพองตัวที่วัดได้ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของกำลังการพองตัวมีลักษณะที่กราฟชันและค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเด็ย จึงมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างสตาร์ชลูกเด็ยและ

สตาร์ชมันฝรั่ง ซึ่งรูปแบบกำลังการพองตัวที่แตกต่างกันระหว่างสตาร์ชลูกเดือย สตาร์ชข้าว และ สตาร์ชมันฝรั่ง อาจเนื่องจากชนิดของแป้งที่แตกต่างกัน โดยแป้งที่ต่างชนิดกันมีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชลูกเดือยและสตาร์ชข้าวเป็นสตาร์ชจากธัญพืช ในขณะที่ สตาร์ชมันฝรั่งเป็นสตาร์ชจากส่วนหัว ซึ่งสตาร์ชจากธัญพืชจะมีการพองตัวที่ต่ำกว่าสตาร์ชจาก ส่วนหัว เนื่องจากสตาร์ชในกลุ่มนี้มีจำนวนพันธะภายใน โครงสร้างของเม็ดแป้งที่สูงมีผลให้ ความแข็งแรงของเม็ดแป้งมีค่าสูงด้วย จึงเป็นผลให้สตาร์ชในกลุ่มนี้มีการพองตัวที่ได้ต่ำ ในขณะที่ สตาร์ชจากส่วนหัวจะมีการพองตัวที่สูง เนื่องจากพันธะภายในร่างแหของโครงสร้างเม็ดแป้ง อ่อนแอกว่าสตาร์ชจากธัญพืช เป็นผลให้สตาร์ชสามารถพองตัวได้สูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) นอกจากนี้เรื่องชนิดของแป้งที่มีผลต่อกำลังการพองตัวแล้ว ยังมีผล เนื่องจากชนิดโครงสร้างผลึกของสตาร์ชจากการวัดด้วยเครื่อง XRD ที่มีผลต่อการพองตัวของสตาร์ช ที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะการจัดเรียงของโครงสร้างของสตาร์ชลูกเดือยจัดอยู่ในโครงสร้าง ผลึกแบบ A ที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าโครงสร้างของสตาร์ชมันฝรั่งซึ่งมี โครงสร้างผลึกเป็นแบบ B โดย Yuan, Zhang, Dai และ Yu (2007) ได้รายงานว่ สตาร์ชจาก มันสำปะหลังที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A มีกำลังการพองตัวที่ต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่งที่มีโครงสร้างผลึก แบบ B แต่มีค่าสูงกว่าสตาร์ชจาก *Dioscorea nipponica* Makino ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C



ภาพที่ 3 ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ข้าวและพันธุ์ดำ

WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ข้าว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำที่ช่วงอุณหภูมิ 65-95 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 3 พบว่า ค่าการละลายของสตาร์ชทั้ง 2 พันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการละลายของสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะถูกทำลาย ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและโมเลกุลของน้ำสามารถเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระได้ จึงทำให้บางส่วนของสตาร์ชละลายออกมามีผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายออกมามีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ค่าการละลายมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยระหว่าง 2 พันธุ์ พบว่า ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งผลที่ได้ให้ผลในทางตรงกันข้ามกับผลของค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยที่พันธุ์ขาวให้ค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำ ความแตกต่างของค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยระหว่าง 2 พันธุ์ อาจเนื่องจากสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในส่วนอสัณฐานและส่วนผลึกรวมไปถึงปริมาณอะไมโลส (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) โดยคุณสมบัติทางการละลายแสดงให้เห็นถึงพันธะภายในเม็ดสตาร์ชโดยพันธะที่เกิดขึ้นในรัฐที่สามสามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 บริเวณ คือ พันธะบริเวณผลึกและพันธะบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้ง (Onitilo, Sanni, Daniel, Dixon และ Dixon, 2007; กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ซึ่งพันธะภายในเม็ดสตาร์ชที่เกิดขึ้น ได้แก่ พันธะที่เกิดจากการจับกันระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลส อะไมโลสกับอะไมโลเพกติน อะไมโลสกับไขมัน เป็นต้น ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างเม็ดแป้ง โดยมีผลต่อการหลุดออกจากโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินสายสั้นบางส่วนจากเม็ดแป้ง เนื่องจากการวัดค่าการละลายของสตาร์ชเป็นการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายออกมาได้ (Tester และ Morrison, 1990) ซึ่งทางหนึ่งที่เป็นไปได้ คือ อะไมโลสและโครงสร้างของอะไมโลเพกติน สายสั้น ดังนั้น สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสมากกว่าจะมีโอกาสการหลุดออกจากโครงสร้างเม็ดแป้งที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม สตาร์ชที่มีส่วนอสัณฐานมากกว่าก็มีโอกาสการหลุดออกจากโครงสร้างเม็ดแป้งของ อะไมโลเพกตินสายสั้นก็เป็นไปได้มากกว่า แต่ผลของค่าการละลายในสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำที่ได้ นั้นพบว่า สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวที่มีปริมาณอะไมโลสและส่วนของอสัณฐานน้อยกว่ามีค่าการละลายสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ อาจเป็นผลมาจากปริมาณของเถ้าหรือแร่ธาตุต่างๆ ที่แตกต่างกันโดยสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณเถ้าสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ ซึ่งเถ้าหรือแร่ธาตุนั้นสามารถที่จะละลายในน้ำได้ ดังนั้น การที่สตาร์ชลูกเดือยมีปริมาณเถ้าสูงกว่าก็มีโอกาสการละลายของแร่ธาตุน้ำสูงกว่าสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ เป็นผลให้สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าการละลายสูงกว่าพันธุ์ดำ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า ค่าการละลายของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (55.43%)

และค่า (47.10%) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ normal amylose 5 พันธุ์ ซึ่งมีค่าการละลายในช่วง 4.4-8.8% ทั้งนี้ความแตกต่างของค่าการละลายของสตาร์ชลูกเด็ยกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) อาจเป็นผลเนื่องมาจากพันธุ์ของลูกเด็ยที่ต่างกันและการปลูกที่สภาพอากาศหรือภูมิประเทศที่ต่างกัน ให้กำลังการพองตัวกับการละลายที่ต่างกันอย่างเห็นได้

2.2 คุณสมบัติการเกิดเพสท์

คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเด็ย 2 พันธุ์ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แสดงผลในตารางที่ 2 พบว่า ค่าความหนืดสูงสุด ค่าเบรคดาวน์และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดสุดท้ายและค่าเซตแบคของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้ความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์ เนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณอะไมโลส คือ สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่าพันธุ์ขาว แสดงให้เห็นว่า สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีส่วนของอะไมโลเพคตินที่น้อยกว่าพันธุ์ขาว ซึ่งทำให้สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำเกิดการพองตัวได้น้อยกว่าพันธุ์ขาว เนื่องจากโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่มีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมากมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งไม่แข็งแรง ซึ่งมาจากการที่ไม่สามารถจะจัดเรียงตัวได้อย่างหนาแน่น ดังนั้น จากการที่สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีการพองตัวที่ช้ากว่า ส่งผลให้สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่าพันธุ์ขาว แต่การที่ค่าเซตแบคและค่าความหนืดสุดท้ายของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าพันธุ์ขาว เนื่องจากสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีปริมาณอะไมโลสที่สูงกว่า ส่งผลให้โอกาสการจัดเรียงตัวกันของอะไมโลสอีกครั้งมีโอกาสมากกว่าสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว จึงเป็นเหตุให้ความหนืดที่เกิดขึ้นหลังจากลดอุณหภูมิจาก 95 เป็น 50 องศาเซลเซียสของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีค่าสูงกว่าสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว ซึ่งจากงานวิจัยของ Varavinit และคณะ (2003) ได้อธิบายสนับสนุนเกี่ยวกับผลของปริมาณอะไมโลสต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ พบว่า สตาร์ชขาวที่มีปริมาณ อะไมโลสต่ำจะให้คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่สูงกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลส สูงกว่า นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของสตาร์ชลูกเด็ยกับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) พบว่า คุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่วิเคราะห์ได้ของสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Li และ Corke (1999) โดยคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดของสตาร์ช normal amylose 5 พันธุ์นี้มีค่าความหนืดสูงสุด 167-203 RVU ค่าความหนืดสุดท้าย 185-208 RVU ค่าเบรคดาวน์ 47-63 RVU

ตารางที่ 2 คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ

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

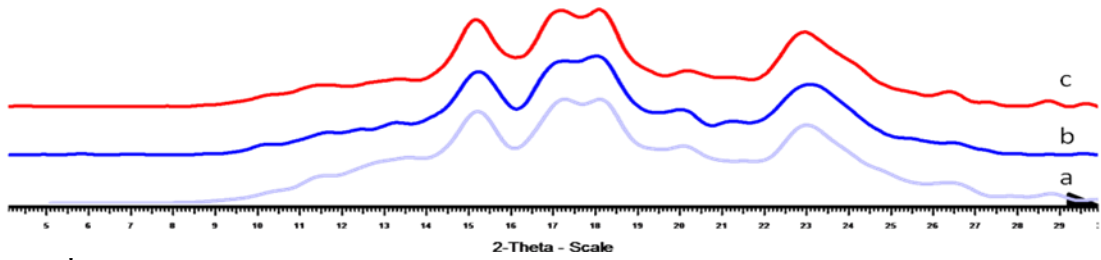
หมายเหตุ WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

และค่าเซตแบค 55-87 RVU ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทางด้านความหนืดที่แตกต่างกันของลูกเดือยที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยของ Li และ Corke (1999) เนื่องจากความแตกต่างในเรื่องของพันธุ์ที่นำมาวิเคราะห์ที่แตกต่างจากงานวิจัยของ 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) นอกจากนี้อิทธิพลร่วมระหว่างความยาวของกิ่งก้านของอะไมโลเพคตินและขนาดโมเลกุลของอะไมโลสก็ส่งผลต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของสตาร์ชด้วย (Jane และ Chen, 1992)

2.3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างและปริมาณผลึก

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึก (X-ray diffraction pattern) ของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำและพันธุ์ขาว จากการวัดด้วย X-Ray diffraction (XRD) พบว่า ลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์จัดอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ A เนื่องจากพบพีคคู่ตำแหน่ง 2θ ที่ 17 และ 17.9 (ภาพที่ 4) เช่นเดียวกับสตาร์ชข้าว (ภาพที่ 4a) โดยแป้งหรือสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคคู่ตำแหน่ง 2θ ที่ 17 และ 17.9 แต่ไม่มีพีคตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 ซึ่งจากการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคของ



ภาพที่ 4 ลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกของลูกเดือยและข้าว (a= สตาร์ชข้าว, b = สตาร์ชลูกเดือย พันธุ์ดำ และ c = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว)

สตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ให้พีคตำแหน่ง 2θ ที่ 17 และ 17.9 แต่ไม่ให้พีคตำแหน่ง 2θ ที่ 5.6 จึงจัดสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A (กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีปริมาณผลึก (relative crystallinity) 24.56% และสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีปริมาณผลึก 22.86% (ตารางที่ 3) ซึ่งปริมาณผลึกที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับสตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ สตาร์ชทริติคัล สตาร์ชข้าวเหนียวเจ้า และสตาร์ชข้าวเจ้า (33.5, 35.2, 35.0, 33.6 และ 28.94% ตามลำดับ) โดยความแตกต่างของปริมาณผลึกขึ้นกับชนิดของ ธัญพืชปริมาณอะไมโลส วิธีการวัดและการคำนวณปริมาณผลึก (Noosuk, Hill, Pradipasena และ Mitchell, 2003; Ao และ คณะ, 2007)

ตารางที่ 3 ปริมาณผลึกของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ

ตัวอย่าง	Relative crystallinity (%)
ลูกเดือยพันธุ์ขาว	24.56±1.14
ลูกเดือยพันธุ์ดำ	22.86±0.98

2.4 คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชัน

คุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยคุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชลูกเดือยที่วัดได้จากเครื่อง DSC ได้แก่ T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ซึ่งคุณสมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์แสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่า T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH 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 ΔH เท่ากับ 68.28, 73.98, 80.94, 12.66 องศาเซลเซียส และ 15.00 (J/g) ตามลำดับ และสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีค่า T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$

ตารางที่ 4 คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ

Sample	Thermal transition parameters				
	T_0 (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_0$ (°C)	ΔH (J/g)
WS	68.28 ± 0.13	73.98 ± 0.77^a	80.94 ± 1.70^a	12.66 ± 1.60^a	15.00 ± 0.24
BS	66.82 ± 0.22	70.98 ± 0.09^b	76.74 ± 0.29^b	9.92 ± 0.09^b	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

ΔH = Enthalpy WS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

และ ΔH เท่ากับ 66.82, 70.98, 76.74, 9.92 องศาเซลเซียส และ 14.22 (J/g) ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ความแตกต่างของค่า T_0 ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณผลึก โดยสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ซึ่งจากงานวิจัยของ Singh และคณะ (2003) ที่รายงานไว้ว่า สตาร์ชที่มีปริมาณผลึกสูงจะให้โครงสร้างที่แข็งแรงและเสถียรสูง ซึ่งมีผลให้เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการต้านความร้อนได้สูง จึงให้คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันสูง ดังนั้น การที่สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีปริมาณผลึกที่สูงกว่าส่งผลให้การให้ความร้อนเพื่อทำลายพันธะในส่วนผลึกของสตาร์ชลูกเด็ยจึงต้องใช้ปริมาณที่สูงกว่าสตาร์ชพันธุ์ดำ มีผลให้ค่า T_0 ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ นอกจากนี้ เมื่อเทียบคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้กับงานวิจัยอื่น 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 ΔH เท่ากับ 8.0-9.9 (J/g) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH ของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยกับสตาร์ชอื่นๆ พบว่า คุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าสตาร์ชข้าวสาลีที่มีค่า T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH 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 ΔH 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 ΔH เท่ากับ 60.7, 64.2, 68.4, 7.7 องศาเซลเซียส และ ΔH เท่ากับ 12.6 (J/g) (Ao และ Jane, 2007) ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันของสตาร์ชลูกเด็ยกับสตาร์ช

จากัญพืชทั้ง 3 ชนิด เนื่องมาจากความแตกต่างในเรื่องของชนิดสตาร์ช รวมถึงปริมาณอะไมโลส และโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกัน

2.5 คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน

คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation properties) เป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินหลังผ่านการให้ความร้อน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิและช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันได้หลากหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Pulses Nuclear Magnetic Resonance และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งในที่นี้ทำการศึกษาคุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC โดยคุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์เกิดได้ช้าและใช้ระยะเวลาในการจัดเรียงโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินใหม่นานถึง 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) แต่ในอีกงานวิจัยหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวเหนียว โดยเก็บตัวอย่างหลังผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเช่นกัน พบว่า ต้องใช้ระยะเวลานานถึง 28 วันในการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ (Lin และ Lii, 2001) และอีกงานวิจัยหนึ่งได้รายงานว่า การเก็บตัวอย่างสตาร์ชที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสของสตาร์ชข้าวสาลีพันธุ์ข้าวเจ้า (normal) และข้าวเหนียว (waxy) ต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชนานถึง 28 วันเช่นกัน (Sasaki และคณะ, 2000) ซึ่งคุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิในการเก็บปริมาณและขนาดของอะไมโลส โครงสร้างของอะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในสตาร์ช โดยปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญมากต่อการคืนตัวของแป้ง โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดือยที่ใช้ระยะเวลานาน อาจเนื่องมาจากปริมาณและขนาดของอะไมโลส หรืออาจเนื่องมาจากปัจจัยในเรื่องของขนาดและการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน ซึ่งแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 7 โดยการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำที่ได้ พบว่า ขนาดและการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดือย

ตารางที่ 5 คุณสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำ หลังจากเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 39 วัน

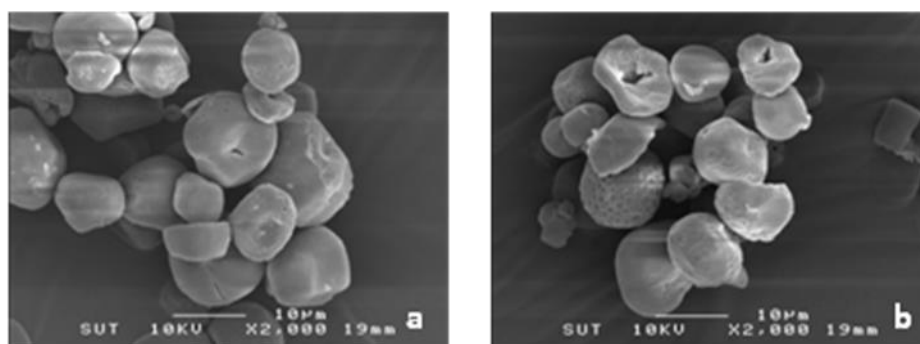
Sample	Thermal transition parameters				
	T_0 (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	$T_c - T_0$ (°C)	ΔH (J/g)
WS	39.02± 0.60	47.02± 1.22	59.48± 1.70 ^a	20.79± 1.42 ^a	8.20± 1.57
BS	40.20± 0.20	45.75± 0.11	52.96± 2.41 ^b	12.76± 4.09 ^b	10.17± 3.33

หมายเหตุ T_0 = gelatinization onset temperature T_p = gelatinization peak temperature T_c = gelatinization completion temperature $T_c - T_0$ = gelatinization temperature range และ ΔH = Enthalpy WS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

มีลักษณะคล้ายคลึงกับสตาร์ชอื่น ๆ ในกลุ่มโครงสร้างผลึกแบบ A เช่น สตาร์ชข้าวสาลี สตาร์ชข้าวบาร์เลย์และสตาร์ชทริติคัล (Ao และ Jane, 2007) ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเด็ยที่ชานี้ อาจเป็นผลมาจากค่าเซตแบคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ในตารางที่ 2 โดยค่าเซตแบคของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำมีค่า 3.11 และ 7.92 ตามลำดับ ซึ่งค่าเซตแบคของสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าเซตแบคของสตาร์ชข้าวสาลี (96.0 RVU) สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ (75.3 RVU) และสตาร์ชทริติคัล (95.4 RVU) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สตาร์ชลูกเด็ยเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเด็ยได้ช้ากว่าสตาร์ชทั้ง 3 ชนิดนี้ นอกจากนี้ ค่าอุณหภูมิการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวมีค่า T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH เท่ากับ 39.02, 47.02, 59.84, 20.79 องศาเซลเซียส และ 8.20 (J/g) ตามลำดับ และสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำมีค่า T_0 , T_p , T_c , $T_c - T_0$ และ ΔH เท่ากับ 40.20, 45.75, 52.96, 12.76 องศาเซลเซียส และ 10.17 (J/g) ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 5

2.6 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช

ลักษณะโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ช (starch granule morphology) ของลูกเด็ย ทำการศึกษาด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงในภาพที่ 5 พบว่า ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำมีลักษณะเป็นเม็ดกลม หลายเหลี่ยม และมีรูพรุนบริเวณผิวด้านนอกที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน (ภาพที่ 5) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชลูกเด็ยมี



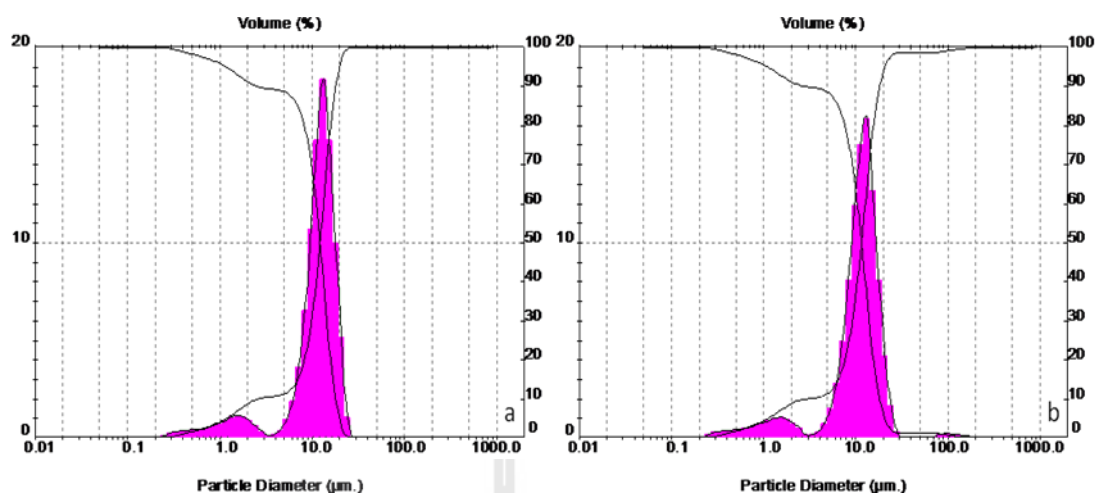
ภาพที่ 5 ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b) ภายใต้กล้อง SEM

ตารางที่ 6 ขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ

ตัวอย่าง	สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว	สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ
Particle size (D4,3) (μm)	11.68±0.07	12.29±0.72

หมายเหตุ D 4,3 = ขนาดของอนุภาคที่มีการกระจายตัวเฉลี่ยสูงสุดของการกระจายตัวทั้งหมด

ลักษณะคล้ายคลึงกับของเม็ดสตาร์ชข้าวโพด (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และขนาดของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Diffraction particle size analyzer พบว่า รูปแบบของการกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชลูกเดือย (particle size distribution) ทั้ง 2 พันธุ์มีลักษณะการกระจายเป็นกลุ่ม 2 ประชากร (bimodel distribution) (ภาพที่ 6) โดยเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.25-3 ไมครอนและ 3-25 ไมครอนและมีค่าเฉลี่ยของขนาดของอนุภาคเม็ดสตาร์ช คือ 11.68 ไมครอน และเม็ดสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2-3 ไมครอนและ 3-30 ไมครอนและมีค่าเฉลี่ยของขนาดของอนุภาคเม็ดสตาร์ช คือ 12.29 ไมครอน (ภาพที่ 6 และตารางที่ 6) ซึ่งขนาดของอนุภาคที่วัดได้เมื่อเทียบกับในงานวิจัยของ Maningat และ Seib (1992) ที่อ้างถึงในกล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) พบว่า ช่วงขนาดของอนุภาคที่วัดได้ของเม็ดสตาร์ชลูกเดือยมีขนาดช่วงที่ กว้างกว่าในงานวิจัยของ Maningat และ Seib (1992) (8-20 ไมครอน)



ภาพที่ 6 การกระจายของขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว (a) และพันธุ์ดำ (b)

2.7 ขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน

ขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคติน (chain-length distributions) ของสตาร์ชลูกเด็ยทั้ง 2 พันธุ์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Anion Exchange Chromatography (HPAEC) แสดงในภาพที่ 7 และตารางที่ 7 พบว่า สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและดำมีการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินมากที่สุดอยู่ในช่วง degree of polymerization (DP) ที่ 13-24 คือ

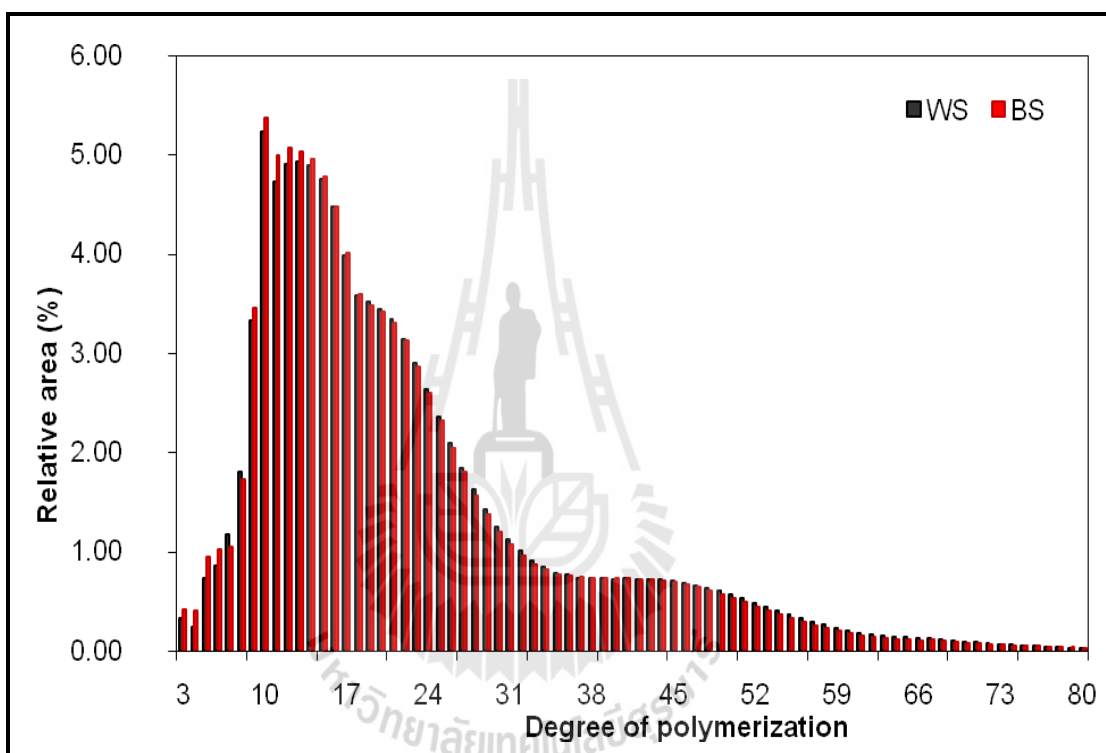
ตารางที่ 7 การกระจายของขนาดของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาวและพันธุ์ดำ

Sample	Peak DP		Average CL _n	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 = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ขาว BS = สตาร์ชลูกเด็ยพันธุ์ดำ DP = degree of polymerization และ CL = chain-length

การจัดแบ่งกลุ่ม DP จัดแบ่งตามนิยามของ Hanashiro, Abe และ Hizukuri (1996)

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) และสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินเฉลี่ย (average CL_n) อยู่ที่ 21.01 และ 20.78 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสตาร์ชข้าวสาลี (23.3) สตาร์ชข้าวบาร์เลย์ (25.7) สตาร์ชทริติคัล (23.8) และสตาร์ช acorn (25.5) (Stevenson และคณะ, 2006 และ Ao และ Jane, 2007)



ภาพที่ 7 การกระจายของขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ
WS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาว และ BS = สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ดำ

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารสกัดพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชจากลูกเดือย (non-starch polysaccharide)

ผลการสกัดกาก A ที่ได้จากการผ่านกรรกลั่นไหลกลับของเอทานอลโดยใช้น้ำพบว่า ไม่พบส่วนของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ชที่สกัดโดยใช้น้ำ องค์ประกอบหลักที่พบในส่วนที่สกัดโดยใช้น้ำคือสตาร์ช (ร้อยละ 83) ที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการย่อยด้วยแอลฟาอะไมเลสแล้ว เมื่อนำมาทดสอบยืนยันโดยการวิเคราะห์หามอนแซ็กคาไรด์โดยใช้เครื่อง HPAEC พบว่าเป็นกลูโคสเท่านั้น

ซึ่งสอดคล้องกับสตาร์ชที่พบ อาจอธิบายได้ว่าการเกาะเกี่ยวกันทางกายภาพ จำนวนและรูปแบบของแขนงอะราบีโนไซแลนในเนื้อเมล็ดลูกเดือย ทำให้ตัวมันอยู่ในเมทริกซ์ที่ซับซ้อนไม่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยน้ำ (Girhammar, Nakamura, and Nair, 1986) นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าพันธะเอสเทอร์โควาเลนต์ระหว่างกรดเพอริริกและองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ลิกนิน ทำให้อะราบีโนไซแลนอยู่ในเมทริกซ์ของผนังเซลล์ที่ไม่สามารถถูกสกัดออกมาได้ (Scalbert, Monties, Lallemand, Guittet, and Rolando, 1985)

กาก B ของลูกเดือยพันธุ์ดำประกอบด้วยน้ำตาลร้อยละ 5.56 อะราบีโนสร้อยละ 1.73 กาแลกโตสร้อยละ 0.36 กุลโคสร้อยละ 2.13 ไซโลสร้อยละ 1.24 และแมนโนสร้อยละ 0.10 ส่วนกาก B ของลูกเดือยพันธุ์ขาวประกอบด้วยน้ำตาลร้อยละ 5.54 อะราบีโนสร้อยละ 1.63 กาแลกโตสร้อยละ 0.35 กุลโคสร้อยละ 1.85 ไซโลสร้อยละ 1.25 และแมนโนสร้อยละ 0.07 และเมื่อนำกาก B มาสกัดด้วยสารละลายต่าง 0.5 M NaOH พบว่ามีส่วนที่สกัดได้ด้วยต่างหรือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ ปริมาตรร้อยละ 0.10 และ 0.09 (น้ำหนักแห้ง) ในลูกเดือยพันธุ์ดำและพันธุ์ขาว โดยพบว่าส่วนที่สกัดได้ดังกล่าวมีโปรตีนอยู่สูงถึงร้อยละ 47.8 และ 37.4 ตามลำดับ (ตารางที่ 8) ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยทั้ง 2 พันธุ์ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่คล้ายคลึงกันคือ มีกรด กลูตามิกและเมทไทโอนีน ซัลโฟนในปริมาณสูง และมีกรดซิตตริก กรดฟีนอลิก และไอโซลิวซีนในปริมาณต่ำ เป็นที่น่า

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย (น้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบทางเคมี	ลูกเดือยพันธุ์ดำ	ลูกเดือยพันธุ์ขาว
โปรตีน (%)	47.8 ± 0.19	38.4 ± 0.98
เถ้า (%)	24.4 ± 0.03	30.1 ± 0.13
น้ำตาลทั้งหมด (%)	18.5 ± 0.55	15.2 ± 0.54
กรดยูโรนิก (%)	2.1 ± 0.14	1.7 ± 0.01
มอโนแซ็กคาไรด์ (%)		
อะราบีโนส	6.6 ± 0.02	5.1 ± 0.04
ไซโลส	5.3 ± 0.02	4.1 ± 0.06
กุลโคส	4.9 ± 0.17	5.6 ± 0.18
กาแลกโตส	1.0 ± 0.14	0.8 ± 0.04
แมนโนส	0.2 ± 0.00	0.2 ± 0.02
อะราบีโนส/ไซโลส	1.25	1.24

ตารางที่ 8 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย (น้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบทางเคมี	ลูกเดือยพันธุ์ดำ	ลูกเดือยพันธุ์ขาว
แร่ธาตุ (%)		
P	5.9	8.4
Ca	3.0	3.8
Na	1.5	2.2
S	0.6	0.4
Mg	0.09	0.09
K	0.02	เล็กน้อย
Cu	เล็กน้อย	0.02
Zn	เล็กน้อย	0.02
Fe	เล็กน้อย	< 0.01
Cd, Cr, Ni, Pb, Mo, Co	เล็กน้อย	เล็กน้อย
กรดอะมิโน (%)		
Cysteic acid	1.8	2.3
Aspartic acid	5.6	5.9
Serine	4.8	5.1
Glycine	5.0	5.2
Histidine	4.5	4.5
Arginine	8.1	9.0
Threonine	2.8	2.8
Methionine sulfone	12.0	11.7
Alanine	6.3	6.0
Proline	8.7	8.4
Tyrosine	3.1	3.1
Valine	4.3	4.2
Lysine	3.8	4.4
Isoleucine	2.3	2.2
Leucine	5.4	4.9
Phenlyalanine	2.1	2.0

สังเกตว่า ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณเถ้าสูงคือร้อยละ 24.4 และ 30.1 และพบว่าฟอสฟอรัสและแคลเซียมเป็นแร่ธาตุหลักที่พบในส่วนที่สกัดได้นี้ ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ที่พบในธัญชาติมีส่วนเกี่ยวข้องกับกรดไฟติกที่เกิดขึ้นในส่วนใดส่วนหนึ่งของเมล็ดในรูปของสารประกอบเกลือของแคลเซียม แมกนีเซียม และโปแตสเซียม (Lolas, Palamidis, and Markakis, 1976; Lott and Ockenden, 1986) ปริมาณกรดยูโรนิกที่หาโดยเปรียบเทียบกับกรดกาแลกทูโรนิกพบว่า มีเพียงร้อยละ 2.1 และ 1.7 และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีร้อยละ 18.5 และ 15.2 (ลูกเดือยเปลือกพันธุ์ดำและพันธุ์ขาวตามลำดับ)

การวิเคราะห์ชนิดของมโนแซ็กคาไรด์พบว่า ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยเปลือกพันธุ์ดำประกอบด้วยอะราบินอสร้อยละ 6.6 ไชโลสร้อยละ 5.3 กลูโคสร้อยละ 4.9 กาแลกโตสร้อยละ 1.0 และแมนโนสร้อยละ 0.2 ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยพันธุ์ขาว ประกอบด้วยอะราบินอสร้อยละ 5.1 ไชโลสร้อยละ 4.1 กลูโคสร้อยละ 5.6 กาแลกโตสร้อยละ 0.8 และแมนโนสร้อยละ 0.2 อะราบินอสและไชโลสจัดเป็นองค์ประกอบของอะราบินอไซแลนในธัญชาติ ที่อาจมีพันธะเอสเทอร์เกาะเกี่ยวข้องกับกรดเพอรูริกในผนังเซลล์ของเนื้อในเมล็ด (Gubler, Ashford, Bacic, Blakeney, and Stone, 1985) เมื่อถูกย่อยโดยต่าง อะราบินอไซแลนจะถูกปลดปล่อยออกมา (Gruppen, Hamer, and Voragen, 1992; Gubler et al., 1985; Cui, 2001) อัตราส่วนของอะราบินอสและไชโลส (Ara/Xyl) ของลูกเดือยเปลือกสีดำและสีขาวมีค่าเท่ากับ 1.25 และ 1.24 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอะราบินอไซแลนมีลักษณะโครงสร้างที่มีแขนงมาก และมีค่าสูงกว่าในข้าวสาลี (0.6-0.8) (Annison, Choct, and Cheetham, 1992) ข้าวบาร์เลย์ (0.3-0.6) (Izydorczyk, Macri, and MacGregor, 1998) และข้าวไรย์ (0.2-0.6) (Vinkx, Stevens, Gruppen, Grobet, and Delcour, 1995) กาแลกโตสที่พบอาจเป็นองค์ประกอบของอะราบินอคาแลกแทนที่พบทั่วไปในธัญชาติในปริมาณที่ไม่มากนัก (Fincher and Stone, 1986; Neukom and Markwalder, 1975) แมนโนสอาจเป็นองค์ประกอบของกลูโคแมนแนนที่พบทั่วไปในผนังเซลล์ของธัญชาติเช่นกัน (Fincher and stone, 1986) จะเห็นว่าปริมาณของกลูโคสจะมีมากกว่ามโนแซ็กคาไรด์ชนิดอื่น ๆ ถึงแม้ว่าได้ย่อยเอาสตาร์ชออกจากตัวอย่างและมีเพียงน้อยกว่าร้อยละ 1 ของสตาร์ชที่ยังคงเหลืออยู่ในกาก B เท่านั้น

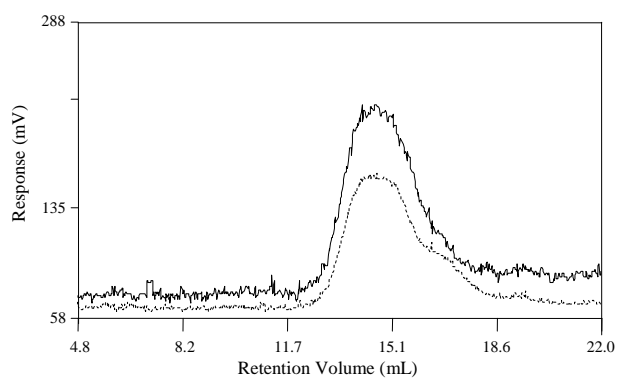
4. ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดโมเลกุล (molecular distribution) และโครงสร้างของสาร non-starch polysaccharide

4.1 การกระจายขนาดโมเลกุลและค่า Intrinsic viscosity ($[\eta]$)

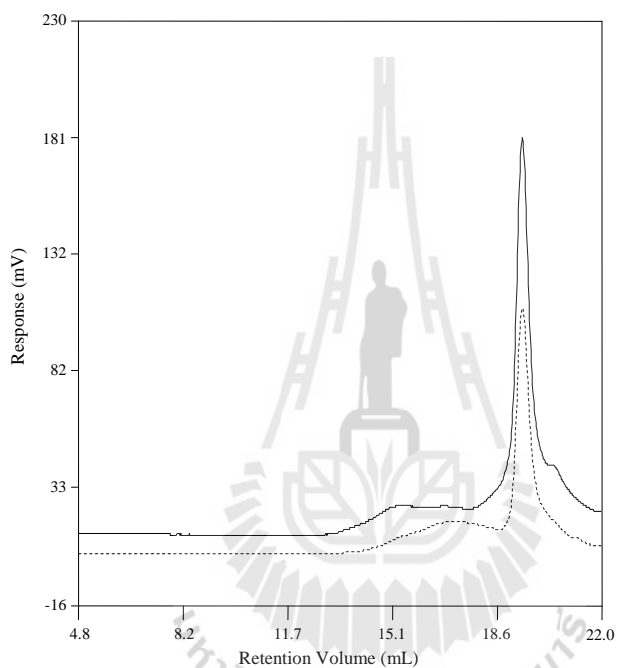
จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดโมเลกุลโดยใช้เครื่องตรวจวัด 3 ชนิดคือ Refractive index, Light scattering, และ Viscometer พบว่า ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำมีสาร 2 ชนิดที่มีขนาด

โมเลกุลต่างกัน (ภาพที่ 8 และ 9) เครื่องตรวจวัด Refractive index และ Viscometer แสดงให้เห็นว่ามีสาร 2 ชนิด (จากกราฟจะเห็นส่วนที่แยกเป็น 2 ส่วน) ที่มีขนาดต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนเครื่องตรวจวัด Light scattering แสดงให้เห็นสารที่แยกได้เพียงส่วนเดียว ซึ่งเป็นส่วนของสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ส่วนสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กเครื่องตรวจวัดชนิดนี้ไม่สามารถแยกส่วนวิเคราะห์ได้ เมื่อนำส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำมาย่อยโปรตีนออกโดยใช้ โปรติเอส แล้วตรวจวัดขนาดโมเลกุลอีกครั้งพบว่า ยอดกราฟเลื่อนไปทางขวาของแกน Retention volume นั้นแสดงว่าขนาดโมเลกุลของสารทั้ง 2 ส่วน มีขนาดเล็กลง ส่วนที่ 1 ของส่วนที่สกัดจากลูกเดือยพันธุ์ขาวมีขนาดโมเลกุลลดลงมากกว่าลูกเดือยพันธุ์สีดำ ผลการทดลองนี้คล้ายคลึงกับสารประกอบอะราบิโนไซแลน-โปรตีนที่สกัดได้จากรำข้าวไรย์ที่พบว่า ขนาดโมเลกุลของสารประกอบอะราบิโนไซแลน-โปรตีนมีขนาดเล็กลงเมื่อถูกย่อยโดยโปรเนส (Pronase) (Ebringerová, Hromádková, and Berth, 1994) ขนาดโมเลกุลของส่วนที่ 1 ของลูกเดือยเปลือกสีดำและสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 741,000 (Pd 1.5) และ 1,449,000 Da (Pd 2.6) และมีค่าลดลงเหลือ 369,000 (Pd 2.7) และ 244,000 Da (Pd 1.6) (ตารางที่ 9) ส่วนที่ 1 มีค่าขนาดโมเลกุลสูงนี้แสดงให้เห็นว่าเป็นส่วนของอะราบิโนไซแลนที่มีแขนงสูง ส่วนที่ 2 เป็นส่วนโปรตีนเพราะมีโปรตีนอยู่ในส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจำนวนมาก มีค่าขนาดโมเลกุล 3,355 และ 4,372 Da ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าพอลิแซ็กคาไรด์มาก ค่าของ Radius of gyration (Rg) และ Intrinsic viscosity ($[\eta]$) มีความสอดคล้องกับขนาดโมเลกุล นั่นคือมีค่าสูงเมื่อขนาดโมเลกุลสูง และมีค่าลดลงเมื่อขนาดโมเลกุลลดลง ขนาดโมเลกุลของอะราบิโนไซแลนจากลูกเดือยมีค่าอยู่ในช่วง 640,000 to 2,220,000 Da ซึ่งเป็นค่าขนาดโมเลกุลของอะราบิโนไซแลนที่พบในข้าวบาร์เลย์ชนิดไม่มีเปลือกหุ้มที่วิเคราะห์โดยใช้เครื่องตรวจวัดชนิด Light scattering เช่นกัน (Storsley, Izydorczyk, You, Biliaderis, and Rossnagel, 2003)

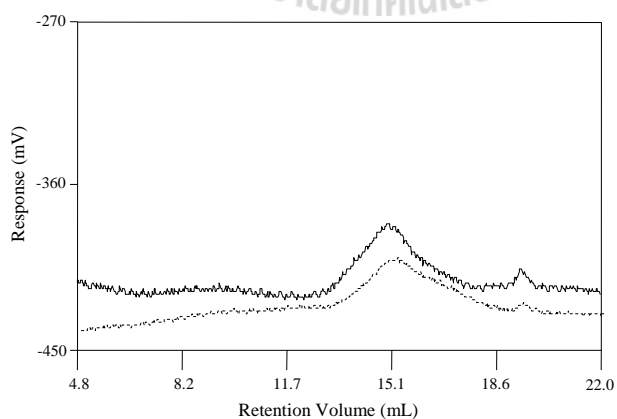
เมื่อนำตัวอย่างส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ มาวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อยืนยันยอดกราฟที่พบคือประกอบด้วยสาร 2 ส่วนนั่นคือพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPSEC ที่มีเครื่องตรวจวัด 3 ชนิดคือ Light scattering, Refractive index และ Ultraviolet ดังแสดงในภาพที่ 10 และ 11 จะเห็นว่าสารส่วนที่ 1 เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องตรวจวัด Light scattering นอกจากนี้ยังพบว่าสารทั้ง 2 ส่วนมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง Ultraviolet นั่นหมายความว่า อาจมีโปรตีนที่มีพันธะทางเคมีกับพอลิแซ็กคาไรด์ในส่วนที่ 1 Storsley et al. (2003) รายงานว่า อะราบิโนไซแลนเกี่ยวข้องกับโปรตีนบางส่วนด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่องวัด Ultraviolet จะเห็นว่าหลังจากตัวอย่างส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำเมื่อถูกย่อยด้วย โปรติเอสที่เป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีนปริมาณกลูโคสและโปรตีนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ปริมาณอะราบิโนสและไซโลสมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่



(a)



(b)



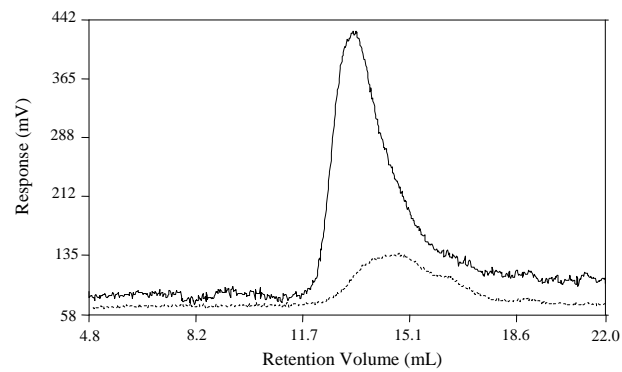
(c)

ภาพที่ 8 Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยพันธุ์ดำ วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด

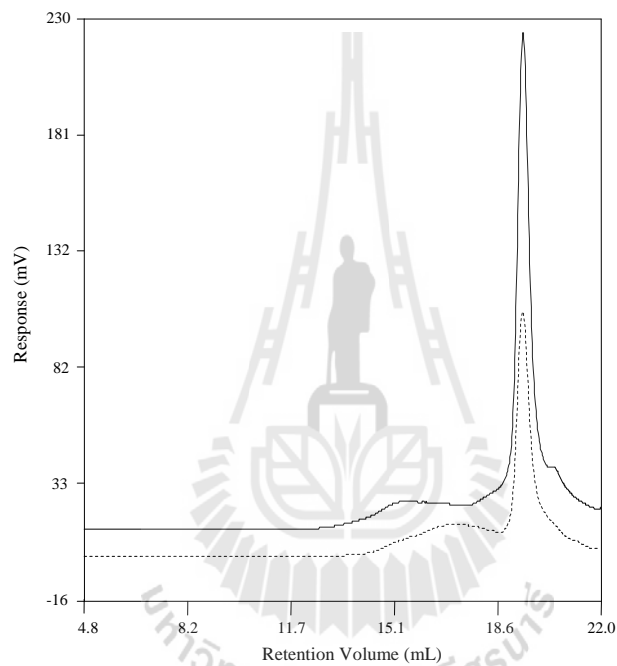
(a) LS = Light scattering detector, (b) RI = Refractive index detector, (c) Viscometer detector

เส้นทึบคือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำก่อนย่อยด้วยเอนไซม์

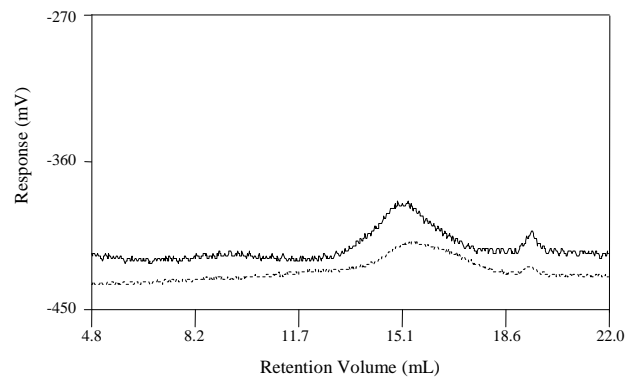
เส้นประคือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำหลังย่อยด้วยเอนไซม์



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 9 Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยพันธุ์ขาว วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด

(a) LS = Light scattering detector, (b) RI = Refractive index detector, (c) Viscometer detector

เส้นทึบคือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำก่อนย่อยด้วยเอนไซม์

เส้นประคือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำหลังย่อยด้วยเอนไซม์

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักโมเลกุล (MW), radius of gyration (Rg), การกระจายโมเลกุล (Pd), และ intrinsic viscosity [η] ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ วัดโดย HPSEC

ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ	MW (Da)		Rg (nm)		Pd		[η] (dl/g)	
	F1 ¹	F2 ²	F1	F2	F1	F2	F1	F2
ลูกเดือยพันธุ์ดำ								
A	741,000	3,355	44.5	1.8	1.5	1.0	3.1	0.05
B	369,000	3,032	27.2	1.6	2.7	1.8	2.2	0.04
ลูกเดือยพันธุ์ขาว								
A	1,449,000	4,372	52.3	1.7	2.6	2.1	3.5	0.04
B	244,000	2,382	22.9	1.4	1.6	1.0	1.7	0.03

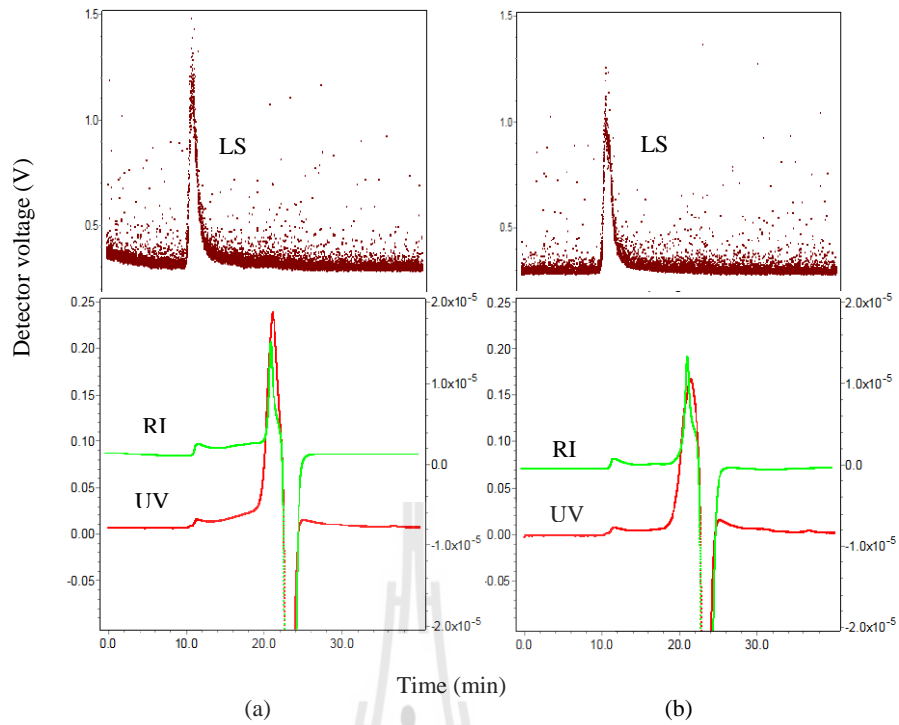
A = ก่อนย่อยด้วยเอนไซม์, B = หลังย่อยด้วยเอนไซม์, F1 = ส่วนที่ 1, F2 = ส่วนที่ 2

¹ใช้ค่า $dn/dc = 0.146$ ml/g ในการคำนวณ MW ; ²ใช้ค่า $dn/dc = 0.190$ ml/g ในการคำนวณ MW

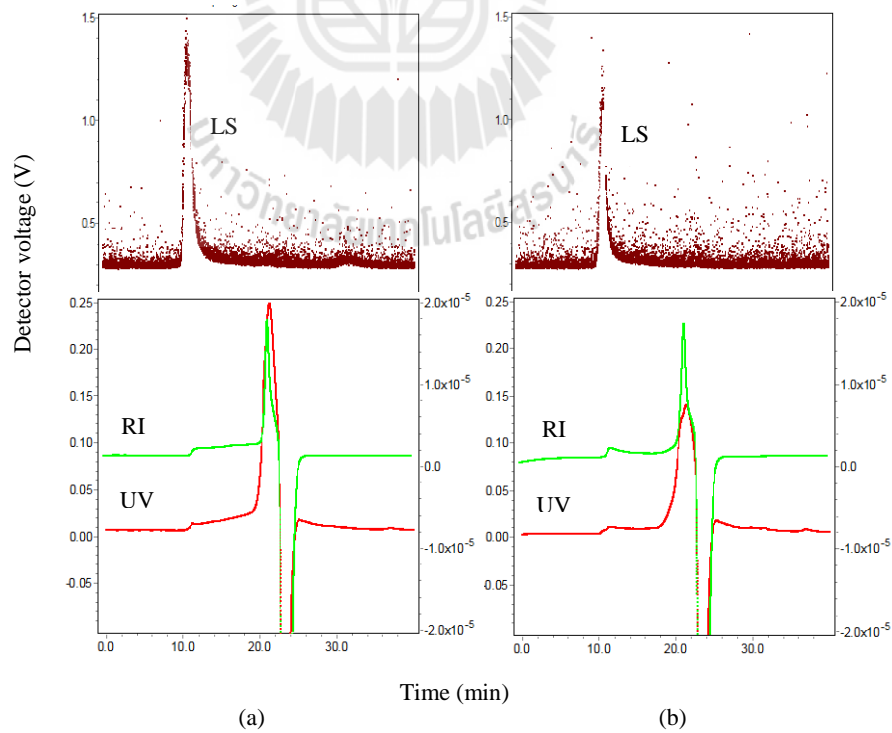
ตารางที่ 10 มอนอแซ็กคาไรด์และองค์ประกอบทางเคมีของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำก่อนและหลังย่อยด้วยเอนไซม์

ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ	ลูกเดือยพันธุ์ดำ		ลูกเดือยพันธุ์ขาว	
	A	B	A	B
อะราบีโนส (%)	6.6 \pm 0.02	18.3 \pm 0.05	5.1 \pm 0.04	15.0 \pm 0.09
ไซโลส (%)	5.3 \pm 0.02	14.6 \pm 0.00	4.1 \pm 0.06	12.4 \pm 0.13
กลูโคส (%)	4.9 \pm 0.17	0.60 \pm 0.02	5.6 \pm 0.18	0.8 \pm 0.05
กาแลกโตส (%)	1.0 \pm 0.14	2.6 \pm 0.07	0.8 \pm 0.04	2.1 \pm 0.10
แมนโนส (%)	0.2 \pm 0.00	0.3 \pm 0.10	0.2 \pm 0.02	0.4 \pm 0.01
อะราบีโนส/ไซโลส	1.25	1.25	1.24	1.21
โปรตีน (%)	47.8 \pm 0.19	21.4 \pm 0.30	38.4 \pm 0.98	22.4 \pm 0.37
เถ้า (%)	24.4 \pm 0.03	20.8 \pm 0.03	30.1 \pm 0.13	25.5 \pm 0.22
กรดยูโรนิก (%)	2.1 \pm 0.14	4.6 \pm 0.19	1.7 \pm 0.01	3.5 \pm 0.02

A = ก่อนย่อยด้วยเอนไซม์, B = หลังย่อยด้วยเอนไซม์



ภาพที่ 10 Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ดำ
วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด; LS = Light scattering detector,
RI = Refractive index detector, UV = Ultraviolet detector



ภาพที่ 11 Elution profile ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ขาว
วัดจากเครื่องตรวจวัด 3 ชนิด; LS = Light scattering detector,
RI = Refractive index detector, UV = Ultraviolet detector

อัตราส่วนระหว่างอะราบิโนสและไซโลสยังคงมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของตัวอย่างที่ไม่ถูกย่อย (ตารางที่ 10) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กลูโคสอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์-โปรตีน โดยที่โปรตีนนั้นถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ ขนาดโมเลกุลของอะราบิโนไซแลนที่พบในลูกเดี๋ยนี้มีค่าสูงกว่าสารสกัดอะราบิโนไซแลนจากลูกเดี๋ยยที่ Yamada, Yanahira, Kiyohara, Cyong, and Otsuka (1987) ได้รายงานไว้คือ 70,000-160,000 Da อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์และองค์ประกอบต่าง ๆ ของเนื้อในเมล็ดลูกเดี๋ยย ค่า dn/dc ของสารละลายตัวอย่างของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดี๋ยยพันธุ์ดำและพันธุ์ขาวมีค่า 0.16 และ 0.15 มิลลิลิตรต่อกรัม และมีค่าลดลงเมื่อถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ลดลงเหลือ 0.14 และ 0.14 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์ที่เพิ่มขึ้น (ประมาณร้อยละ 20) มีผลต่อค่า dn/dc ถึงแม้ว่าขนาดโมเลกุลมีค่าลดลงอย่างมากก็ตาม

ตารางที่ 11 Intrinsic viscosity ($[\eta]$) ของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ วัดโดย HPSEC and Capillary viscometer

ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ	$[\eta]$ (overall) ¹ (dl/g)	$[\eta]$ (water) ² (dl/g)	$[\eta]$ (0.05 M NaCl) ² (dl/g)
ลูกเดี๋ยยเปลือกสีดำ			
A	0.29	0.26	0.25
B	0.38	0.36	0.37
ลูกเดี๋ยยเปลือกสีขาว			
A	0.20	0.19	0.21
B	0.29	0.27	0.26

A = ก่อนย่อยด้วยเอนไซม์, B = หลังย่อยด้วยเอนไซม์, ¹ = วัดโดย HPSEC, ² = วัดโดย Capillary viscometer; เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ในตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ค่า Overall $[\eta]$ ของสารละลายตัวอย่างส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำที่ทดสอบโดยเครื่อง HPSEC มีค่าสูงกว่าค่าที่ทดสอบโดย Capillary viscometer เล็กน้อย ตัวอย่างที่ไม่ได้ย่อยด้วยเอนไซม์และย่อยด้วยเอนไซม์แล้วของลูกเดี๋ยยเปลือกสีดำ มีค่า $[\eta]$ สูงกว่าลูกเดี๋ยยพันธุ์ขาว ค่า $[\eta]$ ของตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ย่อยด้วยเอนไซม์โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.29 เป็น 0.38 เดซิลิตรต่อกรัม และ 0.20 เป็น 0.29 เดซิลิตรต่อกรัม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณหรือความเข้มข้นของพอลิแซ็กคาไรด์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 10) เมื่อนำตัวอย่างมาละลายใน 0.05 M NaCl เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ละลายในน้ำพบว่า ค่า $[\eta]$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่าง

ชัดเจน นั้นหมายความว่าพอลิแซ็กคาไรด์ในส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำมีค่าประจุต่ำซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดยูโรนิกที่พบ

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร non-starch polysaccharide

4.2.1 การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชัน (Methylation analysis)

การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชันเป็นการวิเคราะห์เพื่อทดสอบรูปแบบของพันธะไกลโคเจน (Glycosidic linkage) โดยการเปรียบเทียบสเปกตรัมของยอดกราฟของสารที่ถูกแยกโดยเครื่อง GC นำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบที่ได้กล่าวไว้ (Carpita and Shea, 1989) โดยอยู่บนหลักการที่ว่า รูปร่าง (Configurations) ของอะราบิโนสและไซโลสของอะราบิโนไซแลนจากธัญชาติมีลักษณะเป็นแบบ แอล-ฟูราโนส (L-furanose) และ ดี-ไพราโนส (D-pyranose) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ของการแยกสาร PMAA และรูปแบบพันธะของอะราบิโนไซแลนจากส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ทางเมทิลเลชันและรูปแบบพันธะของอะราบิโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย

Methylated sugar	รูปแบบพันธะ	Molar ratio*	
		ลูกเดือยพันธุ์ดำ	ลูกเดือยพันธุ์ขาว
2, 3, 5-tri-O-methyl arabinitol	T-Araf	3.6	3.1
2, 3-di-O-methyl pentitol	1,4-Xylp	1.0	1.0
2-O-methyl pentitol	1, 3, 4-Xylp	2.4	3.7
1-deuterio pentitol pentaacetate	1, 2, 3, 4-Xylp	1.4	1.4
4-O-methyl pentitol	1, 2, 3-Xylp (end)	0.7	0.2
2, 4-di-O-methyl pentitol	1, 3-Xylp (end)	0.1	0.1
2, 3, 6-tri-O-methyl hexitol	1, 4-Galp	1.1	0.5
2, 3, 4-tri-O-methyl hexitol	1, 6-Galp	0.4	0.5
3, 6-di-O-methyl hexitol	1, 2, 4-Galp	0.5	0.3
2, 3, 4, 6-tetra-O-methyl hexitol	1-Galp (end)	0.4	0.1

* อัตราส่วนโมลาร์คำนวณจากอัตราส่วนความสูงของยอดกราฟเทียบกับความสูงยอดกราฟของ 1, 4-Xylp

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อะราบินโนไซแลนของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ดำและพันธุ์ขาวมีพันธะที่คล้ายคลึงกัน อนุพันธ์อะราบินฟูราโนซิล (Araf) และไซโลไพราโนซิล (Xylp) เป็นองค์ประกอบของอะราบินโนไซแลน โดยที่ Araf เป็นอนุพันธ์เกาะอยู่ที่ปลายเป็น Non-reducing terminal (T-Araf) จะเห็นได้จากค่า 2, 3, 5-tri-O-methyl arabinitol มีค่าสูง T-Araf เป็น 1 อนุพันธ์ของ Araf ที่เป็นแขนงด้านข้างของสายโซ่ที่ต่อกันของแกน (1, 4)-ไซแลน (Xylan) Araf เกาะอยู่กับแกนไซแลนตรงตำแหน่ง O-3 ของแต่ละตัวของ Xylp เป็นจำนวนมากซึ่งสังเกตได้จากค่าของ 2-O-methyl pentitol และ 2, 4-di-O-methyl pentitol รองลงมาคือตำแหน่ง O-2 และ O-3 บน Xylp เดียวกัน ซึ่งสังเกตจากค่า 1-deuterio pentitol pentaacetate และ 4-O-methyl pentitol ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่ามี Xylp บางส่วนที่ไม่มีอนุพันธ์ใดมาเกาะเกี่ยวข้อง ซึ่งสังเกตได้จากค่า 2, 3-di-O-methyl pentitol อะราบินโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ดำมีอัตราส่วนของ Xylp ที่ไม่มีแขนงต่อ Xylp ที่มีแขนงเกาะ 1 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง คือ 4.6 และ 1.2 ส่วนของอะราบินโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือยพันธุ์ขาวมีอัตราส่วนคือ 5.4 และ 2.4 ตามลำดับ ไม่พบ Araf เกาะที่ตำแหน่ง O-2 ของแกนไซแลนในอะราบินโนไซแลนทั้ง 2 ชนิด

อะราบินโนไซแลนจากลูกเดือยมีลักษณะโครงสร้างที่มีปลายอะราบินโนสเกาะอยู่บน O-3 ของ Xylp จำนวนมากคล้ายกับอะราบินโนไซแลนที่สกัดได้ด้วยน้ำที่พบในแป้งสาลี (Gruppen et al., 1992) และในเมล็ดข้าวไรย์ (Bengtsson and Aman, 1990) อัตราส่วนของ Araf/Xylp ของอะราบินโนไซแลนจากลูกเดือยสีดำและสีขาวคือ 0.6 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนที่พบโดยการวิเคราะห์ด้วย HPAEC อาจเป็นเพราะว่าปฏิกิริยาการเกิดน้ำตาลเมทิลเลตติด (Methylated sugar) ในกระบวนการเมทิลเลชันไม่สมบูรณ์ หรือมี Araf บางส่วนระเหยสูญหายไป ในระหว่างปฏิกิริยาเนื่องจากเป็นสารที่ระเหยได้ง่าย จึงทำให้ค่า Araf มีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ส่วนอนุพันธ์กาแลกโทรไพราโนซิล (Galp) ที่พบเป็นแกนของ (1, 4)- และ (1, 6) ของ อะราบินโนกาแลกแตนที่มี Araf มาเกาะเกี่ยวข้องตรงตำแหน่ง O-2 สังเกตจาก 3, 6-di-O-methyl hexitol ที่พบ

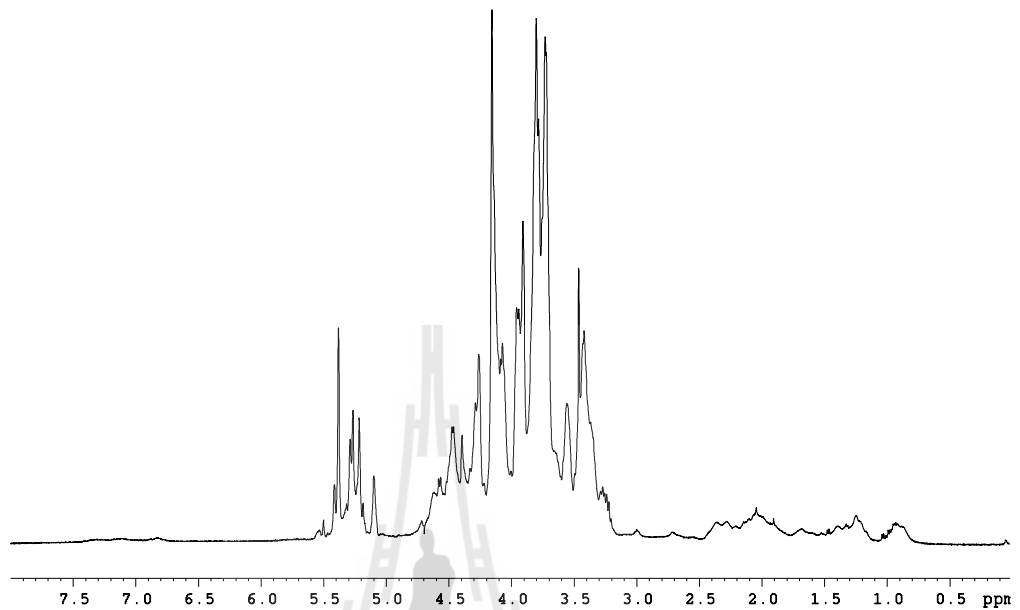
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ ^1H NMR, ^{13}C NMR และ 2D NMR

จากผลการทดลองโดยวิธีเมทิลเลชันพบว่า ชนิดพันธะของอะราบินโนไซแลนจากลูกเดือยทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงวิเคราะห์โครงสร้างของอะราบินโนไซแลนจากลูกเดือยพันธุ์ดำเพียงชนิดเดียวโดยวิธี ^1H NMR, ^{13}C NMR และ 2D NMR วิเคราะห์โครงสร้างของอะราบินโนไซแลนโดยคุณสมบัติของ NMR เปรียบเทียบกับเอกสารพบว่า สัญญาณที่เห็นเป็นยอดกราฟที่พบในช่วง 5.2-5.4 ppm โดย ^1H NMR เป็นอะโนเมอร์ริกโปรตอน (Anomeric proton) ของ $\alpha\text{-L-Araf}$ ที่เป็นแขนง และสัญญาณที่อยู่ในช่วง 4.4-4.8 ppm เป็นของอะโนเมอร์ริกโปรตอน

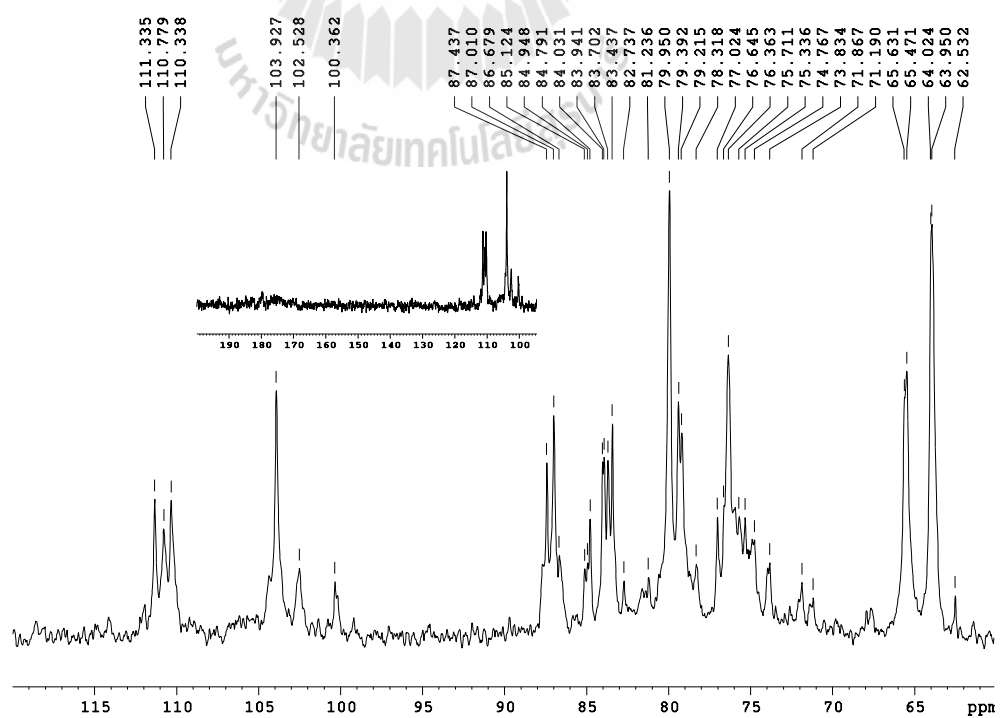
ของแกน β -D-Xylp (Izydorczyk and Biliaderis, 1992; Annison et al., 1992; Bengtsson and Åman, 1990; Westerlund, Andersson, and Åman, 1993; Ebringerová et al., 1994; Ebringerová, Hromádková, Petráková, and Hricovíni, 1990; Hoffmann, Kamerling, and Vliegenthart, 1992) สเปกตรัมของอะราบีโนไซแลนที่พบในช่วง 5.10-5.38 ppm โดย ^1H NMR เป็นอะโนเมอร์ิกโปรตอน ของ Araf (ภาพที่ 12) โดยที่สัญญาณที่เห็นเป็นยอดสูงที่ 5.38 ppm เป็นอะโนเมอร์ิกโปรตอนของ α -L terminal Araf ที่เกาะเกี่ยวตรงตำแหน่ง O-3 ของ Xylp ส่วนสัญญาณอีก 2 ยอดกราฟที่ 5.20 และ 5.25 ppm ที่มีค่าความเข้มใกล้เคียงกันคืออะโนเมอร์ิกโปรตอนของ α -L-Araf ที่เกาะเกี่ยวเป็นแขนง 2 กิ่งตรง O-2 และ O-3 ของ Xylp ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า Xylp มี α -L-Araf มาเกาะเกี่ยวตรงบริเวณ O-3 เป็นจำนวนมากสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีเมทิลเลชัน และยังพบสัญญาณของอะโนเมอร์ิกโปรตอนที่ 5.10 ppm ที่อาจเป็น β -L-Araf (Ebringerová et al., 1990) อย่างไรก็ตาม สัญญาณตรงจุดนี้ไม่ปรากฏให้เห็นในสเปกตรัมของ ^{13}C NMR สัญญาณตรงบริเวณ 4.46 ppm เป็นสัญญาณของ Xylp ที่ไม่มีส่วนแขนงใด ๆ มาเกาะเกี่ยว และสัญญาณที่เป็นเป็นยอดกราฟเล็ก ๆ บริเวณ 4.58 และ 4.61 ppm เป็นสัญญาณของ Xylp ที่มี Araf มาเกาะ 1 ตำแหน่งตรง O-3 และ 2 ตำแหน่งตรง O-2 และ O-3 ตามลำดับ เส้นสเปกตรัมของ ^1H NMR ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงสัญญาณบริเวณ 6-8 ppm ซึ่งเป็นสัญญาณของสารกลุ่มฟีนอลิก (Saulnier et al., 1999) แสดงว่าอะราบีโนไซแลนจากลูกเดือยไม่มีสารกลุ่มฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย

ผลการวิเคราะห์ ^{13}C NMR เพื่อยืนยันโครงสร้างที่ซับซ้อนของอะราบีโนไซแลน แสดงในภาพที่ 13 สัญญาณของอะโนเมอร์ิกคาร์บอน (Anomeric carbon) ตรงตำแหน่ง 111.335, 110.779, และ 110.338 ppm เป็นสัญญาณของ α -L-Araf ที่เกาะเกี่ยวกับ Xylp แต่ละตัวตรงตำแหน่ง O-2 และ O-3, และ O-3 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่มีการรายงานไว้ (Hoffmann, Roza, Maat, Kamerling, and Vliegenthart, 1991; Hoffmann et al., 1992; Annison et al., 1992; Bengtsson and Åman, 1990; Ebringerová et al., 1994; Nandini and Salimath, 2002; Izydorczyk and Biliaderis, 1992; Izydorczyk and Biliaderis, 1992) สัญญาณตรงบริเวณ 103.927, 102.528, และ 100.362 ppm เป็นสัญญาณของอะโนเมอร์ิกคาร์บอน β -D-Xylp ที่ไม่มี α -L-Araf มาเกาะเกี่ยว และมี α -L-Araf มาเกาะเกี่ยวตรงตำแหน่ง O-3, และตำแหน่ง O-2 และ O-3 ตามลำดับ สเปกตรัมทั้ง 2 ของ ^1H NMR และ ^{13}C NMR แสดงให้เห็นว่า Xylp ที่มี α -L-Araf มาเกาะเกี่ยวมีค่าความเข้มข้นต่ำกว่า Xylp ที่ไม่มี α -L-Araf มาเกาะ อาจมีสาเหตุมาจากการเกิด Shielded electrons ส่วนอนุพันธ์อีกตัวที่พบคือ Galp ไม่มีสัญญาณให้เห็นในสเปกตรัม เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยเกินไปจนเครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้ นอกจากนี้พบว่าไม่มีสัญญาณหรือยอดกราฟให้เห็นบริเวณช่วง 170-180 ppm แสดง

ให้เห็นว่า อะราบิโนไซเลนจากลูกเต๋อยไม่มีกรดโครินิก (Cui, 2005) หรือมีกรดโครินิกอยู่น้อยมากจนเครื่องตรวจวัดไม่ได้



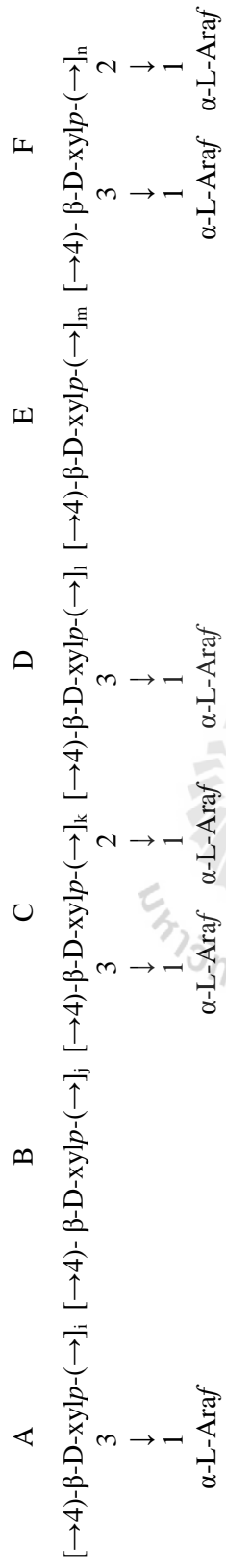
ภาพที่ 12 สเปกตรัม ^1H NMR ของอะราบิโนไซเลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำเทียบกับ TMS



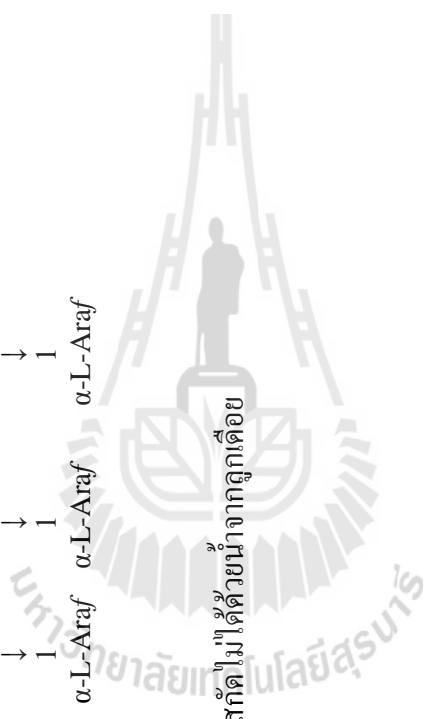
ภาพที่ 13 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของอะราบิโนไซเลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำเทียบกับ TMS

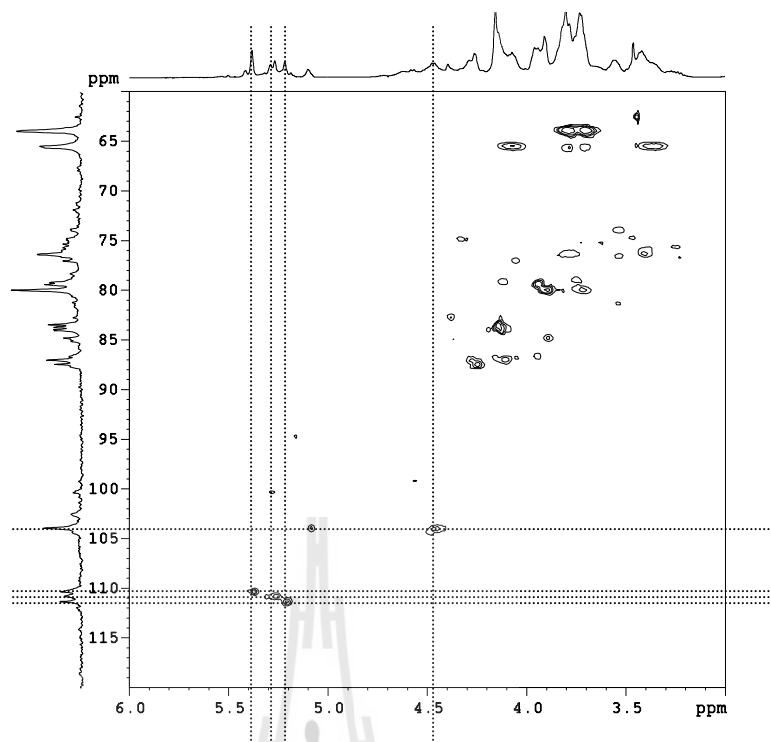
ภาพที่ 14 เป็นภาพที่แสดงถึงโครงสร้างที่เป็นไปได้ของอะราบินโนไซแลนจาก ลูกเต๋อยุ่ใช้ประกอบการอธิบายสเปกตรัม 2D NMR Heteronuclear Multiple Quantum Coherence (HMQC) ซึ่งเป็นชนิดของ 2D NMR ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสเปกตรัม ^1H และ ^{13}C (ภาพที่ 15) สเปกตรัมของอะโนเมอริกโปรตรอนและอะโนเมอริกคาร์บอนมีความสอดคล้องกัน นั่นคือสัญญาณของ C-1 ตรงบริเวณ 111.335 และ 110.779 ppm คือ $\alpha\text{-L-Araf}$ ที่เกาะเกี่ยวกับ O-2 และ O-3 ของ Xylp (อนุพันธ์ C และ F, ภาพที่ 14) ซึ่งมีจุดตัดกับสัญญาณ H-1 ตรงบริเวณ 5.20 และ 5.25 ppm ตามลำดับ C-1 ตรงบริเวณ 110.338 ppm เป็น $\alpha\text{-L-Araf}$ ที่เกาะเกี่ยวกับ O-3 ของ Xylp (อนุพันธ์ A และ D, ภาพที่ 14) เพราะว่ามีจุดตัดของ H-1 เกิดขึ้นตรงบริเวณ 5.38 ppm จะสังเกตเห็นว่า H-1 ตรงบริเวณ 5.10 ppm ซึ่งวิเคราะห์ว่าอาจเป็น $\beta\text{-L-Araf}$ ไม่ได้มีจุดตัดหรือมีความสัมพันธ์กับช่วง C-1 ของ Araf แต่มีความสัมพันธ์กับบริเวณ C-1 ของ Xylp มากกว่า H-1 ตรงบริเวณ 4.46 ppm เป็นแกนของ $\beta\text{-D-Xylp}$ ที่ไม่มีอนุพันธ์ใดมาเกาะ (อนุพันธ์ B และ E, ภาพที่ 14) ซึ่งสอดคล้องกับ C-1 ตรงบริเวณ 103.927 ppm ในสเปกตรัมนี้เมื่อลากผ่านเส้นของยอดกราฟ H-1 และ C-1 จะไม่พบจุดตัดของ Xylp ที่ถูกเกาะเกี่ยวบริเวณตำแหน่ง O-3 และ ตำแหน่ง O-2 และ O-3

ผลการทดลองการใช้ NMR แบบ 2 มิติ คือ $^1\text{H}/^1\text{H}$ correlation spectroscopy (COSY) (ภาพที่ 16) เพื่อทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงของโปรตอนในวงแหวนของน้ำตาลพบว่า อะโนเมอริกโปรตอน (H-1S) ของ Araf ที่เชื่อมกับ Xylp เดียวกันตรงตำแหน่ง O-2 และ O-3 เชื่อมโยงกับ H-2S ของ Xylp (สังเกตจากจุดตัดในกราฟภาพที่ 16) แต่ไม่พบการเชื่อมโยงกันระหว่าง H-1 ของ Araf ที่เชื่อมกับ H-2 ของ Xylp ตรงตำแหน่ง O-3 นอกจากนี้ยังพบว่า H-1S ของ Xylp ที่มี Araf เชื่อมต่อตรงตำแหน่ง O-3 และตำแหน่ง O-2 และ O-3 เชื่อมโยงกับ H-2S ส่วนการเชื่อมโยงของโปรตอนตัวอื่น ๆ คือ H-3, H-4, และ H-5 ในวงแหวนของน้ำตาล ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนเพราะว่าโปรตอนเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมากจนจุดตัดมีการซ้อนทับกัน

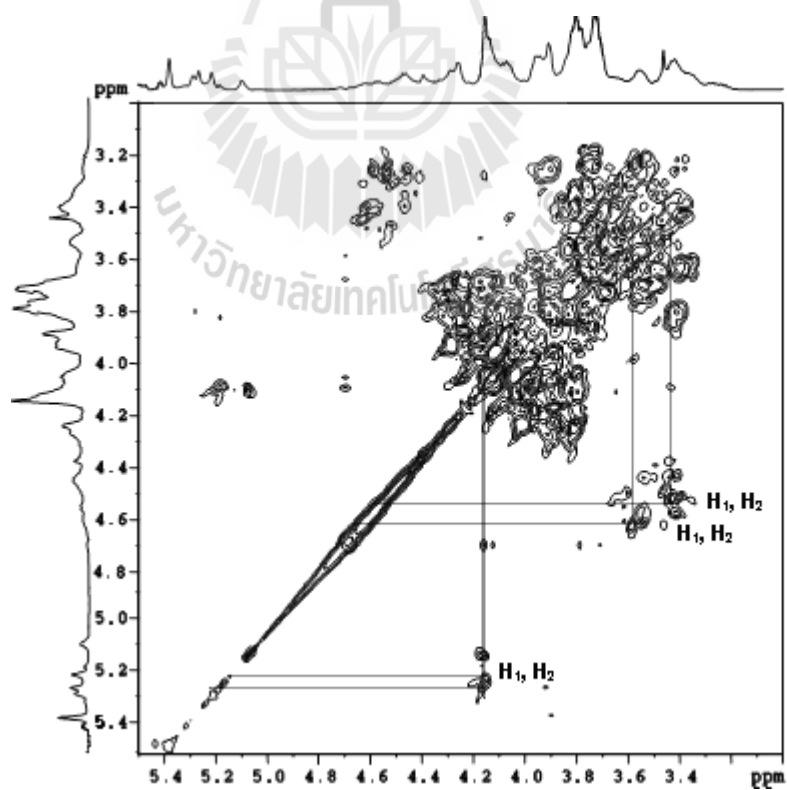


ภาพที่ 14 โครงสร้างของอะราบิโนไซคลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเคียว





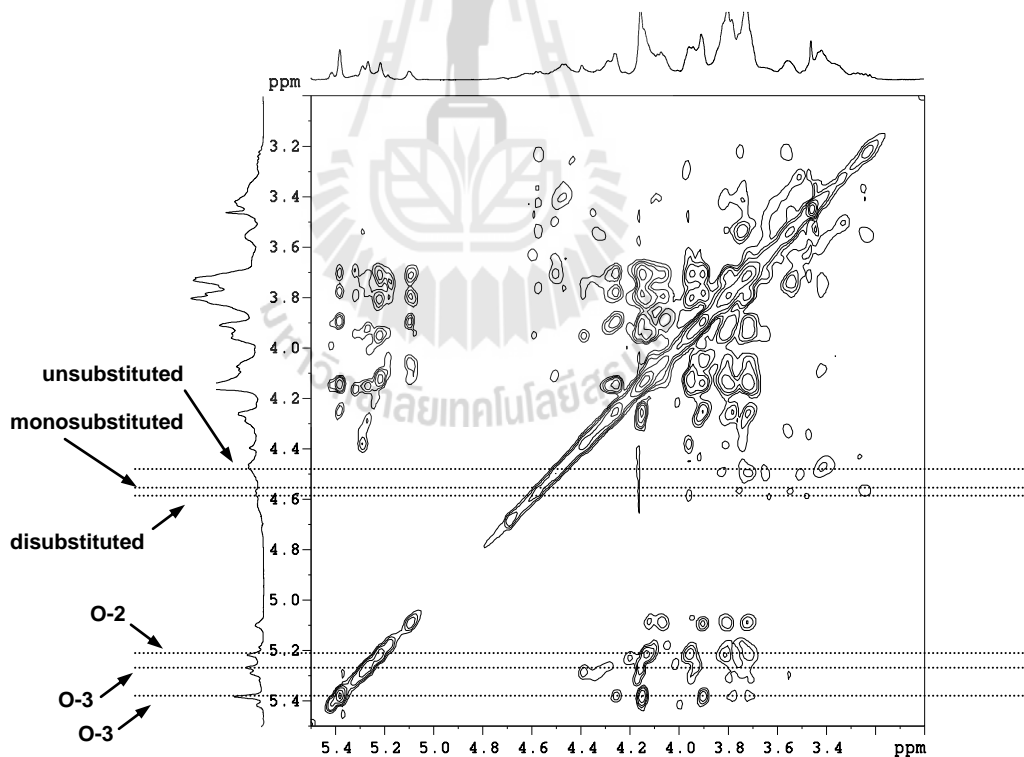
ภาพที่ 15 $^{15}\text{H}/^{13}\text{C}$ HMQC correlation ของอะราบีโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ



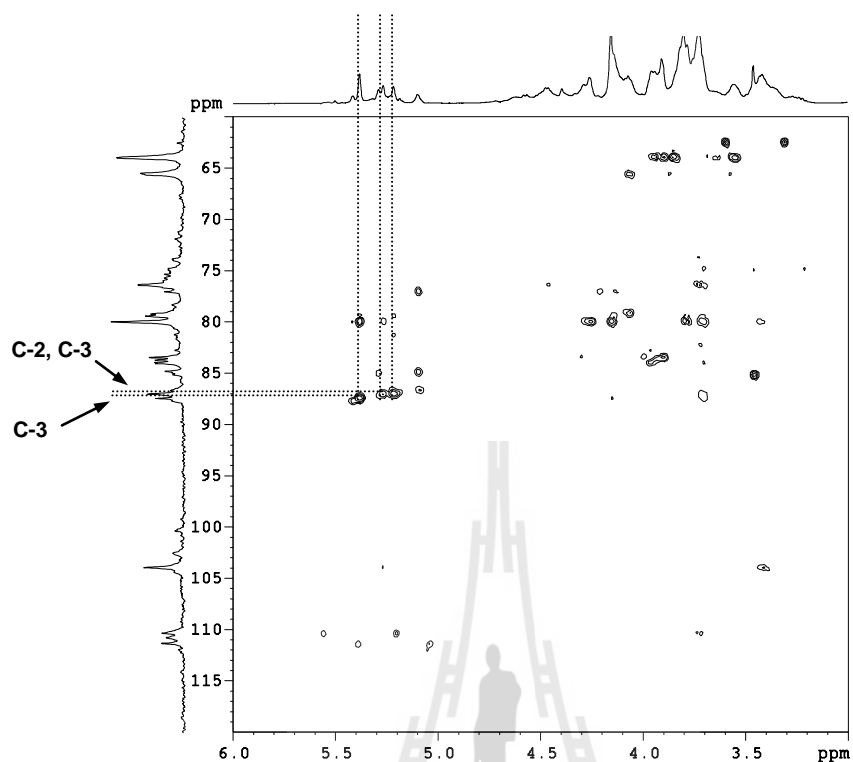
ภาพที่ 16 $^1\text{H}/^1\text{H}$ NMR COSY ของอะราบีโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ

การทดลองแยกสัญญาณโปรตอนในน้ำตาลตัวเดียวกันโดยใช้ Total $^1\text{H}/^1\text{H}$ correlation spectroscopy (TOCSY) พบว่าสเปกตรัมสามารถแยกจุดโปรตอนของ Araf ที่เชื่อมต่อกับ Xylp ที่ตำแหน่ง O-3, และ O-2 และ O-3 ได้ทุกตัว (ภาพที่ 17) และยังพบว่าโปรตอนทุกตัวของ Xylp ทั้งที่มี และไม่มี Araf มาเกาะเกี่ยว สามารถแยกเห็นจุดของโปรตอนได้เช่นกัน

ภาพที่ 18 เป็นกราฟที่ระบุถึงความสัมพันธ์ของลำดับพันธะของแกนไซแลนและ Araf ที่มาเกาะเกี่ยวโดยวิธี Long-range heteronuclear correlation spectrum (HMBC) จากกราฟอธิบายได้ว่าเส้นจุดตัดของยอดกราฟที่ลากผ่านตรง H-1/C-3 ของ Araf เกาะตรงตำแหน่ง O-3 ของ Xylp คืออนุพันธ์ A และ D ส่วนจุดตัดตรง H-1/C-2 ของ Araf ที่เกาะตรงตำแหน่ง O-3 และ O-2 ของ Xylp คืออนุพันธ์ C และ F ในภาพที่ 14 จากการวิเคราะห์โดยวิธี NMR ทั้งหมดได้แก่ ^1H and ^{13}C NMR และ แบบ NMR แบบ 2 มิติ ได้แก่ COSY, TOCSY, HMQC, และ HMBC และรวบรวมข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสามารถระบุค่าตำแหน่งของ H และ C, และ ค่า Chemical shift ของอนุพันธ์ต่าง ๆ ของอะราบีโนไซแลนจากลูกเดียวได้ดังแสดงในตารางที่ 13



ภาพที่ 17 $^1\text{H}/^1\text{H}$ NMR TOCSY ของอะราบีโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ



ภาพที่ 18 $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ HMBC correlation ของอะราบินโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำ

ตารางที่ 13 Chemical shift (δ) ของสเปกตรัม ^1H NMR และ ^{13}C NMR ของอะราบินโนไซแลนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย และสเปกตรัม TOCSY, HMQC, COSY, และ HMBC

Glucosyl residues	Assigned H, C position ¹	^1H (ppm) ²	^{13}C (ppm) ³
α -L-Araf O-3 linked	1	5.38	110.338
	2	3.90	79.950
	3	4.14	83.437
	4	4.25	87.437
	5-eq	3.77	65.471
	5-ax	3.72	

ตารางที่ 13 (ต่อ) Chemical shift (δ) ของสเปกตรัม ^1H NMR และ ^{13}C NMR ของอะราบีโนไซแลน
ที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย และสเปกตรัม TOCSY, HMQC, COSY, และ HMBC

Glucosyl residues	Assigned H, C position ¹	^1H (ppm) ²	^{13}C (ppm) ³
α -L-Araf O-3 linked (also at O-2)	1	5.25	110.779
	2	4.15	84.791
	3	3.94	79.392
	4	4.38	83.437
	5-eq	3.79	64.024
	5-ax	3.71	
α -L-Araf O-2 linked (also at O-3)	1	5.20	111.335
	2	4.13	87.010
	3	3.95	79.392
	4	4.20	-
	5-eq	3.81	64.024
	5-ax	3.72	
β -L-Araf	1	5.10	103.927 region of Xylp anomeric carbon
	2 (from COSY)	4.07	65.471
	-	4.12	-
	-	3.91	-
	-	3.81	65.471
	-	3.72	
β -D-Xylp disubstituted	1	4.61	100.362
	2	-	87.010 (from HMBC)
	3	-	87.010 (from HMBC)
	-	-	-
	-	-	-
	-	-	-

ตารางที่ 13 (ต่อ) Chemical shift (δ) ของสเปกตรัม ^1H NMR และ ^{13}C NMR ของอะราบิโนไซแลน ที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากลูกเดือย และสเปกตรัม TOCSY, HMQC, COSY, และ HMBC

Glucosyl residues	Assigned H, C position ¹	^1H (ppm) ²	^{13}C (ppm) ³
β -D-Xylp monosubstituted at O-3	1	4.58	102.528
	2	3.55	74.767
	3	3.64	87.437 (from HMBC)
	4	3.75	79.950
	5-eq	3.95	-
	5-ax	3.48	-
β -D-Xylp unsubstituted	1	4.46	103.927
	2	3.43	62.532
	3	3.65	-
	4	3.72	-
	5-eq	3.83	76.645
	5-ax	3.52	-

¹ เปรียบเทียบกับค่าที่มีการรายงานไว้, ² ได้จากสเปกตรัม ^1H NMR และ TOCSY, ³ ได้จากสเปกตรัม ^{13}C NMR และ HMQC หากไม่ได้มีการระบุไว้

5. ผลการแปรรูปแป้งลูกเดือยด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion)

5.1 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อระดับการเกิดเจลลาทีนในเซชัน

ระดับการเกิดเจลลาทีนในเซชัน (degree of gelatinization, DG) ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดือย แสดงในตารางที่ 14 พบว่า ค่า DG ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดือยที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ อยู่ในช่วง 49-91% โดยที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารลดระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีค่า DG ต่ำที่สุด และที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารลดระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่า DG มากที่สุด จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ความชื้นและอุณหภูมิบารลดไม่มีปฏิสัมพันธ์กัน (interaction) ต่อค่า DG ($p > 0.05$) (ภาคผนวก ง, ตาราง 1ง) แต่ค่า DG ได้รับอิทธิพลมาจากแต่ละปัจจัย คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารลดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า DG จากแต่ละปัจจัยดังภาพที่ 19 โดยภาพที่ 19a แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า DG จากผลของความชื้นของวัตถุดิบ พบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก

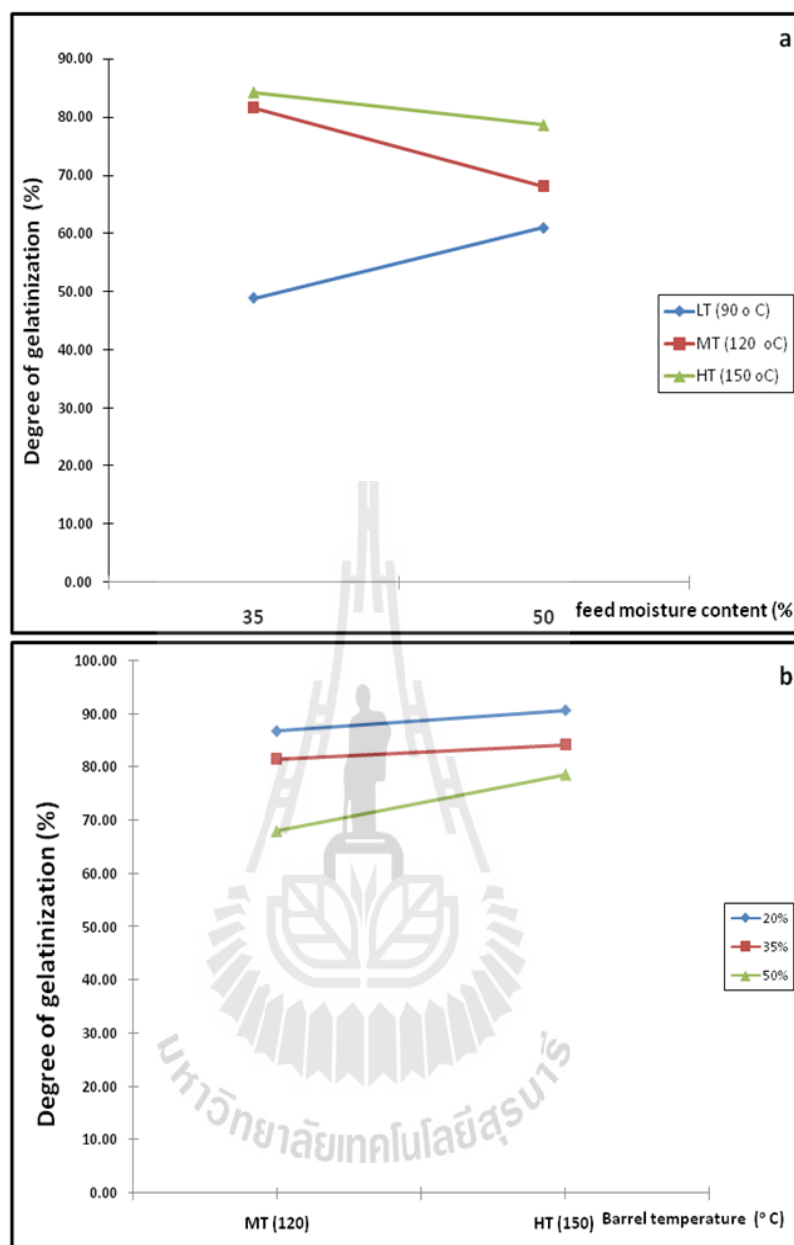
35 เป็น 50% ค่า DG มีค่าลดลงที่อุณหภูมิ바เรระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แต่ที่อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของค่า DG ที่อุณหภูมิ바เรระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เมื่อระดับความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นนั้นเกิดเนื่องจากความชื้นของวัตถุดิบที่สูงขึ้นทำให้ภายในระบบมีปริมาณน้ำมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานรวมภายในระบบรวมทั้งพลังงานความร้อนหรืออุณหภูมิภายในบาเรลดค่าลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลลาทีไนซ์ของสตาร์ชมีปริมาณลดลง ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนเกี่ยวกับการลดลงของค่า DG เมื่อปริมาณน้ำในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น คือ งานวิจัยของณัฐชนก อมรเทวภัทร, เสกสม อาตมางกูร และสายชล เลิศสุวรรณ (2548) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด รายงานว่า ค่า DG ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวโพดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า DG ที่อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เกิดเนื่องจากที่ความชื้นของ

ตารางที่ 14 ระดับการเกิดเจลลาทีไนซ์ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่างๆ

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

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

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 19 ผลของความชื้นและอุณหภูมิบาร์เรตต่อระดับการเกิดเจลลาทีไนเซชัน

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

วัตถุดิบที่ 35 และ 50% เป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำ (low water content) ถึงปานกลาง (intermediate water content) โดยเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีไนซ์ (melting temperature, T_m) ของสตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) จึงทำให้สตาร์ชสามารถเจลลาทีไนซ์ได้มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลลาทีไนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้ ในภาพที่ 19b แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า DG โดยอุณหภูมิบารเรล พบว่า เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิบารเรลระดับกลางเป็นระดับสูงส่งผลให้ค่า DG มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความชื้นของวัตถุดิบทุกระดับ เนื่องจากอุณหภูมิบารเรลที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานภายในระบบทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้น และช่วงอุณหภูมินี้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิ T_c (completion temperature) ของแป้งลูกเดือยพันธุ์ขาว (82.07 องศาเซลเซียส) ทำให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในระบบมีปริมาณมากพอในการทำลายเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้ปริมาณการเกิดเจลาทีไนซ์ของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิบารเรลและอัตราการเติมน้ำ (water injection rate) ต่อค่า DG ในเอกซ์ทรูเดตจากข้าวบาร์เลย์ รายงานว่า ค่า DG ของสตาร์ชบาร์เลย์มีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ในเชิงบวกกับอุณหภูมิบารเรล แต่ค่า DG ของสตาร์ชบาร์เลย์ไม่ได้ขึ้นกับอัตราการเติมน้ำในระหว่างขั้นตอนการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

5.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์

ผลของตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรลต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ (in vitro starch fraction) แสดงในตารางที่ 14 พบว่า แป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณแป้งทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS) ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (rapidly digested starch, RDS) ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (slowly digested starch, SDS) ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RDS เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน เช่น การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้เป็นการแปรรูปโดยอาศัยความร้อนและแรงเฉือนเพื่อทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบซึ่งมีองค์ประกอบของสตาร์ช โปรตีน และไขมัน เป็นต้น ซึ่งการทำลายโครงสร้างเหล่านี้ส่งผลให้ลักษณะหรือความแข็งแรงของโครงสร้างที่ต้านทานการย่อยของเอนไซม์มีปริมาณน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้แป้งเกิดเจลาทีไนซ์ (gelatinize) และเดกซ์ทริไนซ์ (dextrinize) จึงทำให้ในช่วงแรกของการย่อยด้วยเอนไซม์ผสมระหว่าง pancrease และ amyloglucosidase สามารถที่จะเข้าไปย่อยในส่วนของแป้งที่ถูกเจลาทีไนซ์ และถูกเดกซ์ทริไนซ์ได้ก่อนอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้ปริมาณ RDS มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อน (Hagenimana และคณะ, 2006) การที่ปริมาณ RS ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปนั้น อาจเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรดชัน

ของสตาร์ชมีโอกาสเกิดได้น้อย ดังผลการศึกษาก่อนเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยยที่พบว่า ต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดี๋ยยนานถึง 39 วัน จึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณ RS type 3 ซึ่งเป็น RS ที่เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชของลูกเดี๋ยยมีปริมาณน้อยด้วย ทำให้ปริมาณ RS ของแป้งลูกเดี๋ยยโดยรวมนั้นมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูป

ตารางที่ 15 สภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อชนิดของสตาร์ชตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์

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

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%

เมื่อพิจารณาปริมาณ RDS SDS และ RS ของแป้งลูกเดี๋ยยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ พบว่า ปริมาณ RDS SDS และ RS มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แต่มีบางสภาวะการทดลองบางสภาวะการทดลองที่มีปริมาณ RDS SDS และ RS ที่ให้ค่าทางสถิติที่แตกต่าง เช่น ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารเรระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ให้ปริมาณ RDS สูง และที่สภาวะการทดลองที่

ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีปริมาณ RDS ต่ำ หรือปริมาณ SDS มีค่าต่ำที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และมีค่าสูงที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) หรือปริมาณ RS มีค่าสูงที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และมีค่าต่ำที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% และอุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ซึ่งที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีปริมาณ RDS ต่ำส่งผลให้มีปริมาณ SDS ที่สภาวะการทดลองนี้มีค่าสูง อาจเกิดเนื่องจากที่สภาวะการทดลองนี้เป็นสภาวะการทดลองที่มีค่า DG ต่ำที่สุด มีผลให้สัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มีปริมาณมากกว่าแป้งที่เจลาทิไนซ์ เป็นผลให้เอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองสามารถที่จะเข้าไปย่อยในช่วงแรกซึ่งเป็นการย่อยในส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นเหตุให้ปริมาณ RDS ที่วัดได้มีปริมาณต่ำ หลังจากนั้นจึงเป็นการย่อยในส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ ซึ่งที่สภาวะการทดลองนี้มีสัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์สูง เป็นสาเหตุให้ปริมาณ SDS ที่วัดได้มีค่าสูง

การเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS SDS และ RS ขึ้นกับหลายปัจจัย ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติชี้ให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารที่ระดับต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS, SDS และ RS ของแป้งลูกเดือย (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 2ง-4ง) ซึ่งปัจจัยภายในที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการย่อยของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ตามอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ อาทิเช่น การเกิดการจับกันระหว่างสตาร์ชและโปรตีน (starch-protein interaction) ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) ระดับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (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 ของแป้งลูกเดือยที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังผ่านการแปรรูปนั้น เกิดเนื่องจากแป้งลูกเดือยที่นำมาใช้ในการแปรรูปมีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ มากมาย เช่น โปรตีน ไขมัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนในการขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยสตาร์ช โดยจากการศึกษาทางด้านโครงสร้างของลูกเดือย ทำให้ทราบว่าเม็ดสตาร์ชของลูกเดือยถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีนทั้งในรูปแบบที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช หรือที่อยู่อิสระ ดังนั้น โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองจึงมีโอกาสดำเนินไปได้อย่างยากถึงแม้ว่าการแปรรูปด้วยความร้อน มีส่วนช่วยทำให้แป้งเกิดเจลาทิไนซ์และเดกซ์ทริไนซ์ นอกจากนี้ การให้ความร้อนในการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันอาจมีส่วนช่วยทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมัน หรือส่งเสริมการจับกันระหว่างสตาร์ชและโปรตีน ซึ่งสารทั้ง 2 นี้มีผลให้โอกาสการเข้าไปย่อยของเอนไซม์ผสมที่ใช้ในการทดลองมีโอกา

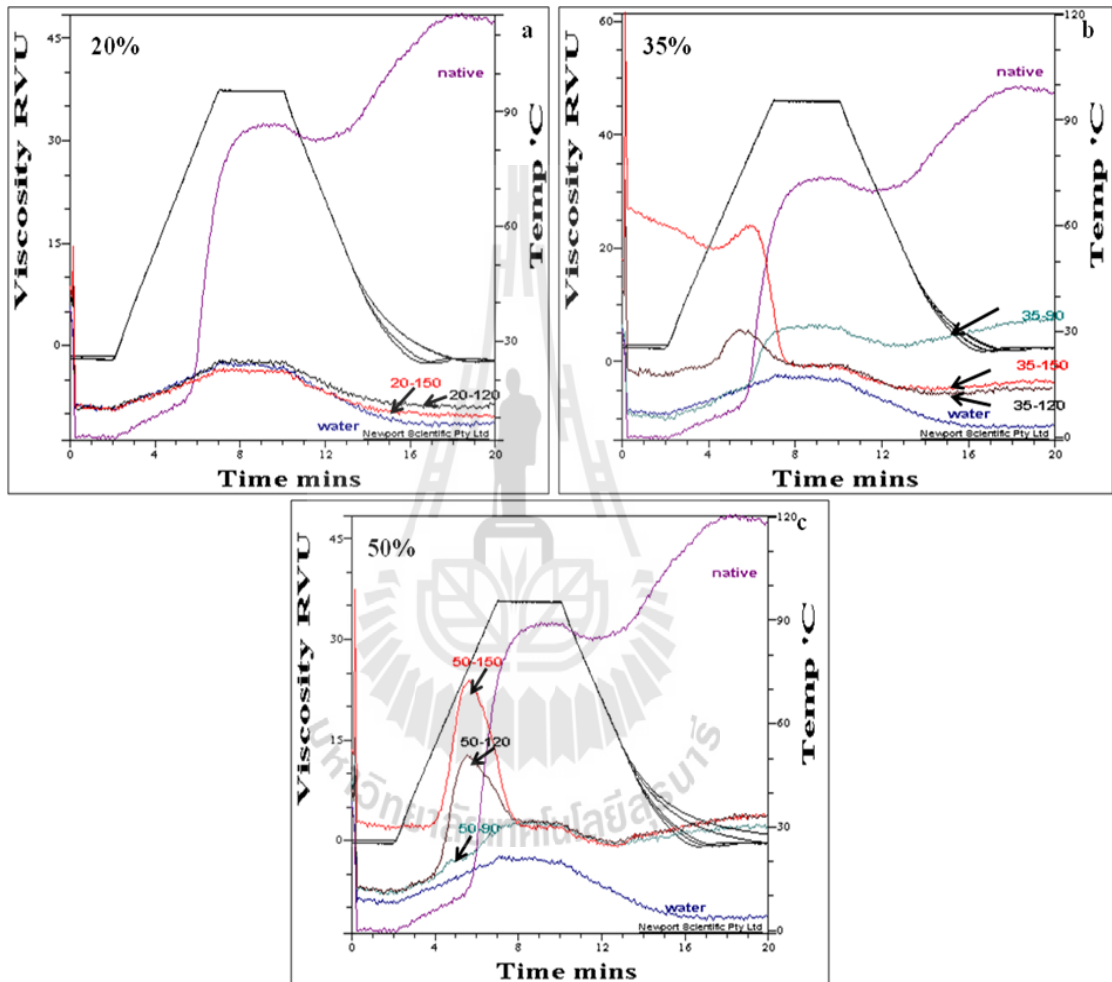
เป็นไปได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนั้น จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DG กับปริมาณ RDS SDS และ RS พบว่า ค่า DG ไม่มีสหสัมพันธ์กับปริมาณ RDS SDS และ RS ($p>0.05$) (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 7ง) หรือคือ ค่า DG ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นกับปริมาณ RDS SDS และ RS ซึ่งในการทดลองนี้ พบว่า DG ที่ระดับ 48.88-90.61% จากสถานะการทดลองต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RDS SDS และ RS นอกจากนี้ จากการศึกษากาการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชลูกเดือยนั้น โอกาสการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ช้าของลูกเดือยดังที่อธิบายข้างต้นนั้นแม้ว่าการทดลองที่สถานะการทดลองต่าง ๆ มีผลให้การเกิดเจลาทีไนซ์และเดกซ์ทริไนซ์ของสตาร์ชที่สถานะการทดลองที่แตกต่างกัน ทำให้โอกาสการสร้าง RS type 3 จากสตาร์ชที่ถูกเจลาทีไนซ์ หรือเดกซ์ทริไนซ์ในลูกเดือยมีโอกาสน้อย ส่งผลให้ปริมาณ RS รวมไม่แตกต่างกันที่สถานะการทดลองต่าง ๆ

5.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

5.3.1 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์

ผลของตัวแปรของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลตต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ (pasting properties) ของแป้งเปียก แสดงในภาพที่ 20 และ 21 พบว่า ความหนืดของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันทุกสถานะการทดลองมีค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแป้งข้าวเจ้าหลังผ่านการคัดแปรด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้รายงานว่าคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวเจ้ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการคัดแปร เมื่อเปรียบเทียบกับโปรไฟล์ความหนืด (pasting profile) ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันหรือเอกซ์ทรูเดต พบว่า โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตขึ้นอยู่กับสถานะการทดลอง เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิบารเลตต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดต (ภาพที่ 20) พบว่า ที่สถานะการทดลองที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารเลตระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ไม่สามารถเห็นพีคความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (cold peak viscosity, CPV) (ภาพที่ 20a) ซึ่งลักษณะโปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่สถานะการทดลองที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิบารเลตระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีโปรไฟล์ความหนืดใกล้เคียงกับโปรไฟล์ความหนืดของน้ำ ในขณะที่ที่สถานะการทดลองที่ความชื้น 35 และ 50% สามารถเห็นลักษณะ CPV ได้ที่อุณหภูมิบารเลตระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แต่ไม่สามารถเห็นลักษณะ CPV ได้ที่อุณหภูมิบารเลตระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ทั้งที่ความชื้น 35 และ 50% (ภาพที่ 20b และ 20c) แต่เมื่ออุณหภูมิบารเลตเพิ่มขึ้นจาก

ระดับกลางสู่ระดับสูง พืช CPV ของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35 และ 50% มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kadan, Bryant และ Pepperman (2003) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวเกี่ยวกับคุณสมบัติการเกิดเฟสท์ของแป้งเปียกที่ว่า พืช CPV ของเอกซ์ทรูเดตแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น



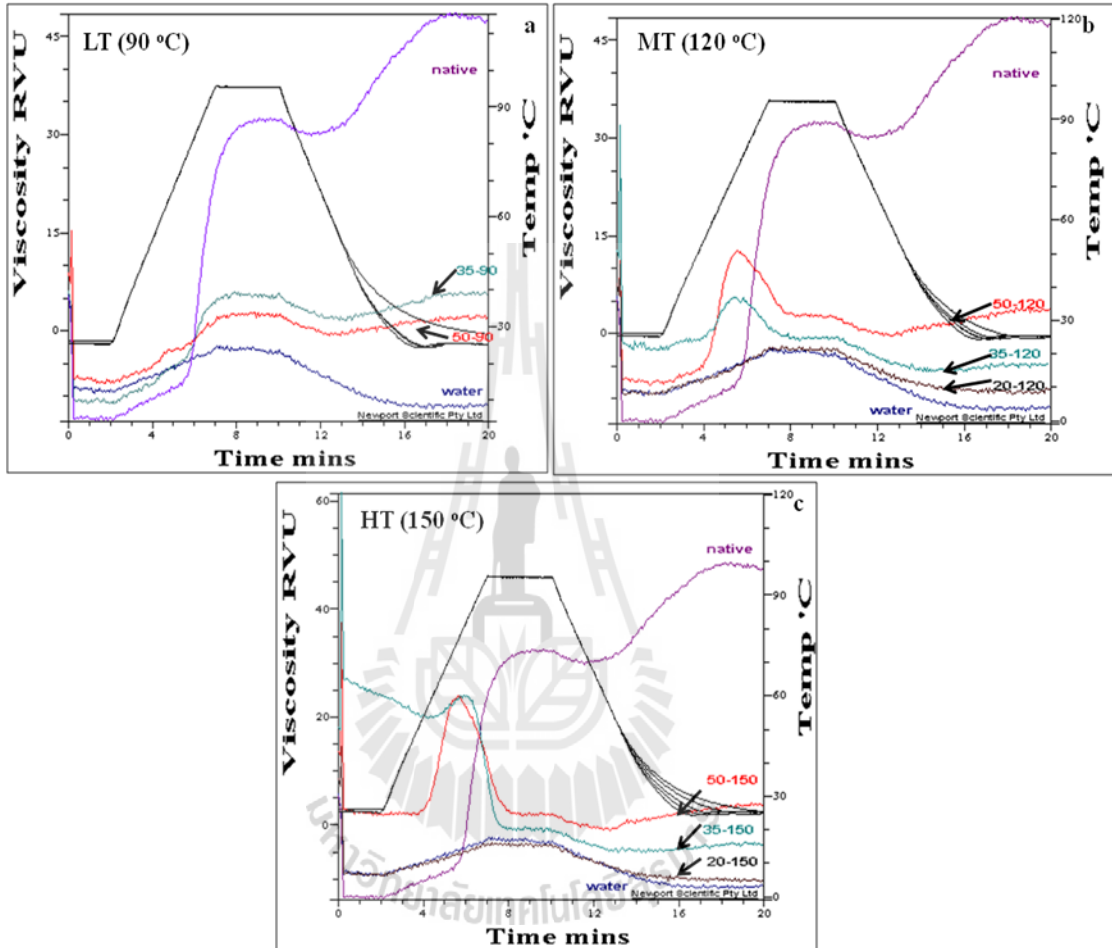
ภาพที่ 20 ผลของอุณหภูมิบารเรลต่อคุณสมบัติการเกิดเฟสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (a= ความชื้นที่ 20% b = ความชื้นที่ 35% และ c= ความชื้นที่ 50%)

ความแตกต่างของความหนืดที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ กลางและสูงมีสาเหตุเนื่องจาก ความแตกต่างของอัตราส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์ต่อแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ หรืออริบายได้ในทอมของค่า DG และความแตกต่างของปริมาณการแตกตัวของโมเลกุลสตาร์ช (Gutkoski และ Dash, 1999; Hagenimana และคณะ, 2006) ซึ่งเกิดจากความร้อนและแรงเฉือนจากกระบวนการ

เอกซ์ทรูชัน โดยพิก CPV ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิบริเวณระดับกลางและสูงเกิดจากความหนืดจากส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์แล้ว ซึ่งมีความสามารถในการดูดน้ำและเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดความหนืดในช่วงต้น และการเพิ่มขึ้นของพิก CPV เมื่ออุณหภูมิบริเวณเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แป้งที่เจลาทิไนซ์สามารถดูดซับน้ำและเกิดความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความหนืดที่เกิดขึ้นในช่วงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการวิเคราะห์ด้วย RVA จาก 25 ถึง 95 องศาเซลเซียสของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิบริเวณระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เกิดขึ้นจากส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ จึงทำให้ความหนืดที่เกิดขึ้นเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า และมีลักษณะรูปแบบความหนืดคล้ายคลึงกับของแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูป (native)

เมื่อพิจารณาผลของความชื้นต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดต (ภาพที่ 21) พบว่า เมื่อปริมาณความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 21b และ 21c) มีผลให้โปรไฟล์ความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเฉพาะที่อุณหภูมิบริเวณระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แต่ที่อุณหภูมิบริเวณระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นส่งผลให้โปรไฟล์ความหนืดมีค่าลดลง (ภาพที่ 21 a) ความแตกต่างของโปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตจากผลของความชื้น เกิดเนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์กับแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ โดยที่อุณหภูมิบริเวณระดับกลางและระดับสูงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีค่าลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า DG (ภาพที่ 19a) มีผลให้สัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มีปริมาณมากขึ้น โดยความหนืดที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ด้วย RVA ในช่วงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ความหนืดที่เกิดขึ้นในช่วงแรกเป็นส่วนที่มาจากแป้งที่เจลาทิไนซ์ แต่หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ ความหนืดที่เกิดขึ้นในส่วนนี้ส่วนใหญ่มาจากส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ ดังนั้น เมื่อสัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้โปรไฟล์ความหนืดโดยรวมมีค่าสูงขึ้น สำหรับโปรไฟล์ความหนืดที่ลดลงของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิบริเวณระดับต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้น เกิดเนื่องจากที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35 และ 50% เป็นช่วงของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงปานกลาง เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ทำให้ค่า T_m ของสตาร์ชลดลง (Roos, 1995) ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณการเกิดเจลาทิไนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มากกว่าของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35% ดังจะเห็นได้จากค่า DG (ภาพที่ 19a) โดยค่า DG ของเอกซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% (60.96%) มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 35% (48.88%) จึงทำให้โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 35% มีค่าสูงกว่าที่

ความชื้น 50% เนื่องจากความแตกต่างของสัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์กับแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น (Hagenimana และคณะ, 2006)



ภาพที่ 21 ผลความชื้นของวัตถุดิบต่อคุณสมบัติการเกิดเพสท์ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (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) มีลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายลดต่ำลงแตกต่างจากลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายของแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ที่อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายมีลักษณะใกล้เคียง กับลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้ายของแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ให้ค่าความหนืดสุดท้ายที่ต่ำกว่าแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งลักษณะโปรไฟล์ความหนืดในช่วงความหนืดสุดท้าย เกิดเนื่องจาก หลังจากส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์เกิดการดูดน้ำและเกิดเจลเพื่อให้เกิดความหนืดแล้ว เมื่อแป้งที่เจลาทิไนซ์ยังได้รับแรงเฉือนจากการกวนตลอดเวลาจากเครื่อง RVA มีผลทำให้แป้งที่เจลาทิไนซ์เกิดการแตกตัวของโมเลกุลแป้งหรือสตาร์ช และไม่สามารถทนต่อแรงเฉือนของเครื่องที่ให้ไว้ หรือกล่าวคือความแข็งแรงของโครงสร้างของแป้งหรือสตาร์ชมีความแข็งแรงลดน้อยลงจากความร้อนในการแปรรูป ส่งผลให้โปรไฟล์ของความหนืดมีค่าลดลง สำหรับ โปรไฟล์ความหนืดช่วงความหนืดสุดท้ายของเอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิ바เรระดับต่ำ ที่ให้ลักษณะที่ใกล้เคียงกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป เนื่องจาก เอกซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองนี้ยังคงเหลือส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์อยู่ ซึ่งแป้งในส่วนนี้ที่ทำหน้าที่แสดงโปรไฟล์ความหนืดช่วงความหนืดสุดท้ายให้คล้ายคลึงกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่การเอกซ์ทรูเดตสภาวะการทดลองนี้ที่มีบางส่วนของแป้งถูกเจลาทิไนซ์จึงมีผลให้ความหนืดที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดือยที่เกิดขึ้น 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) พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในบางกรณีของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดือย เนื่องจากที่สภาวะการทดลองที่ปริมาณความชื้น ในระดับเดียวกันแต่อุณหภูมิ바เรที่แตกต่างกัน ซึ่งในการศึกษานี้พบว่า ที่ความชื้น 20% โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตที่เกิดขึ้นอุณหภูมิ巴เรระดับกลาง ให้โปรไฟล์ความหนืดที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ巴เรระดับสูง แต่ไม่สอดคล้องกับที่ความชื้น 50% ซึ่งให้โปรไฟล์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดือยที่อุณหภูมิ巴เรระดับสูงมีค่าสูงที่สุดและลดลงเมื่ออุณหภูมิ巴เรลดลง

5.3.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

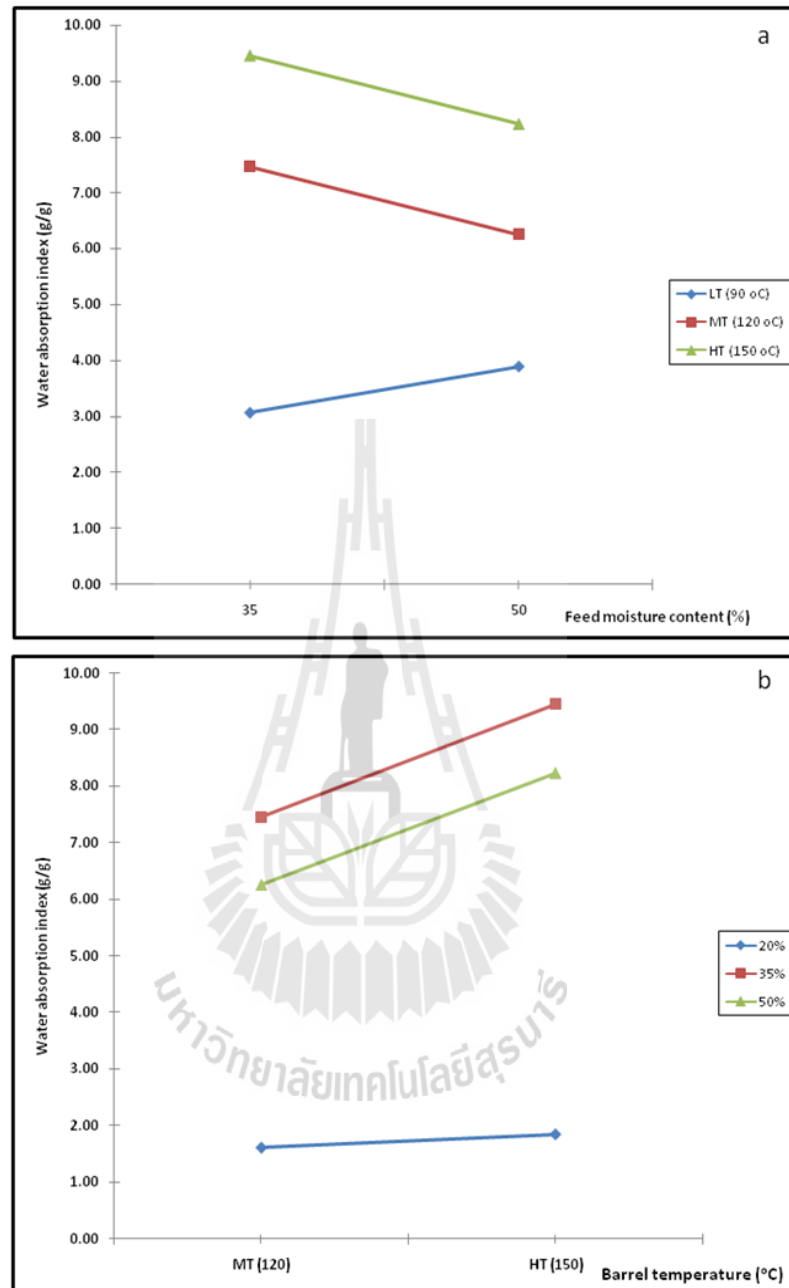
ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 16 และภาพที่ 22 พบว่า ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดแป้งลูกเดือยที่ความชื้น 35 และ 50% มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป แต่ที่ความชื้น 20% ค่า WAI มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) กับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป เมื่อพิจารณาเรื่องอุณหภูมิบารเรล พบว่า ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kadan, Bryant และ Pepperman (2003) ที่ทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงหน้าที่ของเอกซ์ทรูเดแป้งข้าว ได้รายงานค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดแป้งข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของค่า WAI พบว่า ความชื้นและอุณหภูมิบารเรลมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันต่อค่า WAI ($p<0.05$) (ภาคผนวก ง, ตารางที่ 5ง) คือ ที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ค่า WAI มีค่าลดลงเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% แต่ที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% (ภาพที่ 22a) และที่ความชื้นทุกระดับเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้นค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 22b) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดแป้งลูกเดือยที่ได้หลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่แตกต่างกันของแต่ละสภาวะการทดลอง เกิดจากปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างผลของความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรล ของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bryant, Kadan, Champagne, Vinyard และ Boykin (2001) ที่ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่และคุณสมบัติเกี่ยวกับการย่อยของเอกซ์ทรูเดแป้งข้าว รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดจากแป้งข้าวขึ้นกับสภาวะการทดลองและวัตถุดิบที่นำมาแปรรูป เช่น ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของบารเรลเพิ่มขึ้นค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าขึ้นอยู่กัปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ ในขณะที่ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดจากแป้งข้าวเม็ล็ดยาวขึ้นอยู่กัปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบารเรล การลดลงของค่า WAI เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% ที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในระบบส่งผลให้ค่า DG มีค่าลดลง โดยปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานรวมภายในระบบรวมทั้งพลังงานความร้อนหรืออุณหภูมิภายในบารเรลมีค่าลดลง ซึ่งทำให้สัดส่วนของแป้งที่ไม่เจลาติไนซ์ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 50% มีค่ามากกว่าแป้งที่ไม่เจลาติไนซ์ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 35% ซึ่งส่วนของแป้งที่ไม่เจลาติไนซ์สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้น้อยกว่าแป้งที่เจลาติไนซ์ ดังนั้นการที่เอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 50% ที่มีปริมาณแป้งที่ไม่เจลาติไนซ์มีค่ามากกว่า

ตารางที่ 16 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลาย

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

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

เอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 35% ส่งผล ให้เอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 50% สามารถดูดซับน้ำได้น้อยกว่าที่ความชื้น 35% หรือคือมีค่า WAI น้อยกว่าที่ความชื้น 35% จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่า WAI มีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 ถึง 50% นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิบารเรลระดับเดียวกันนี้เมื่อพิจารณาเพิ่มขึ้นของค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 35% พบว่า ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 2 อุณหภูมิบารเรล ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า WAI นั้น เกิดเนื่องจากที่ระดับความชื้นของวัตถุดิบทั้ง 2 ระดับนี้จัดอยู่ช่วง ความชื้นระดับต่ำทั้งคู่ แต่การลดลงของค่า T_m จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (Roos, 1995) ดังนั้น T_m ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 35% จะมีค่าต่ำกว่าของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 20% ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 35% สามารถเจลาไทไนซ์ได้มากกว่าเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 20% มีผลให้แป้งที่เจลาไทไนซ์ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 35% มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 20% ส่งผลให้ปริมาณของแป้งที่สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิต่ำได้หรือคือค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดที่ความชื้น 35% มากกว่าที่ความชื้น 20% เป็นเหตุให้ที่อุณหภูมิบารเรล 2 ระดับนี้ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 35% (Owusu และคณะ, 1993) สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า WAI ที่อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50%



ภาพที่ 22 ผลของความชื้นและอุณหภูมิบาร์ต่อดัชนีการดูดซับน้ำ (a= feed moisture content b= barrel temperature, MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)

เนื่องจากเป็นช่วงของความชื้นจัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงกลาง โดยเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ทำให้ค่า T_m ของสตาร์ชมีค่าลดลง (Roos, 1995) ทำให้ปริมาณการเกิดเจลลาทีนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ที่สภาวะการทดลองของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีสัดส่วนของแป้งที่เจลลาทีนซ์มากกว่าแป้งที่ไม่เจลลาทีนซ์ มีผลให้แป้งที่เจลลาทีนซ์สามารถดูดซับน้ำที่อุณหภูมิค่าได้มากกว่าที่ความชื้น 35% จึงเป็นเหตุให้ค่า WAI ของเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่า WAI เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานรวมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลให้แป้งถูกเจลลาทีนซ์ได้มากขึ้น ทำให้สัดส่วนของแป้งที่เจลลาทีนซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามพลังงานของระบบที่เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มขึ้น

ดัชนีการละลาย (water solubility index, WSI) ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ตรวจวัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 16 พบว่า ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยมีค่าสูงขึ้นหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ทุกสภาวะการทดลองต่าง ๆ ซึ่งค่า WSI มีความสัมพันธ์กับระดับการแตกของโมเลกุล (degree of molecular damage) (Bryant และคณะ, 2001) และขึ้นกับปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ เช่น โปรตีน เป็นต้น (Guha และคณะ, 1997) ดังนั้น การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเฉือน 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 ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ตามแต่ละปัจจัย โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันจากปัจจัยเรื่องความชื้นของวัตถุดิบ พบว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ค่า WSI มีค่าลดลงที่อุณหภูมิบารเรลระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ซึ่งค่า WSI ที่ลดลงของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยที่

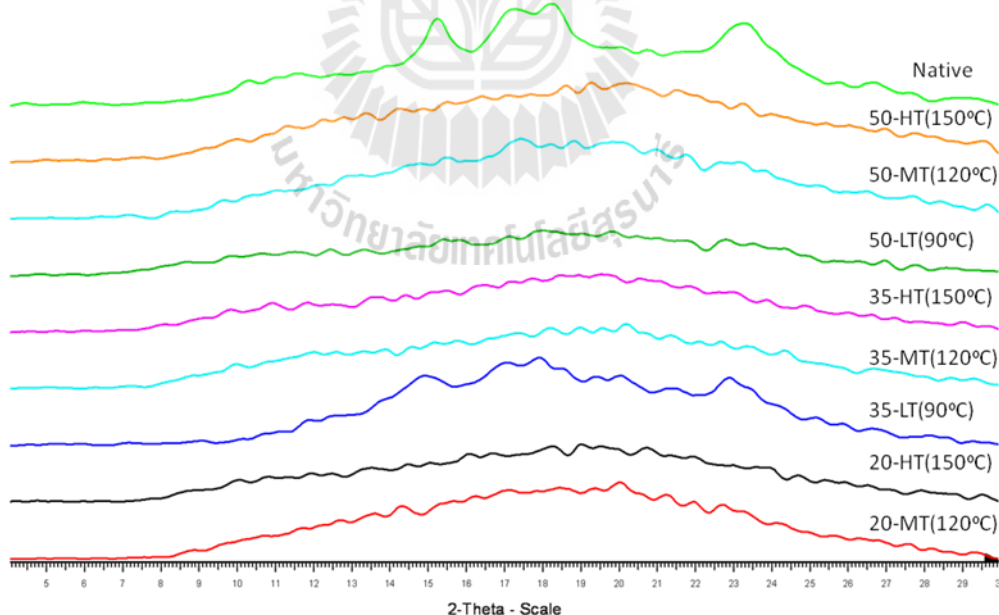
ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่ม ขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Bryant และคณะ (2001) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงหน้าที่และคุณสมบัติ เกี่ยวกับการย่อย ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ที่รายงานว่ ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวมีค่าลดลง เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Gujral, Singh และ Singh, (2001) ที่ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของเอกซ์ทรูเดต corn grit พันธุ์ฟลินท์ (flint) และข้าวโพดหวาน (sweet corn) รายงานว่ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดต corn grit พันธุ์ฟลินท์และข้าวโพดหวานมีค่าลดลงเมื่อ ความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Hagenimana และคณะ (2006) รายงานว่ เมื่อ ความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้น ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวเจ้ามีค่าลดลง เช่นกัน การลดลงของค่า WSI เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิบารเลระดับกลางและสูง เนื่องจาก ที่อุณหภูมิทั้ง 2 ระดับนี้เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำภายในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง ส่งผลให้พลังงานรวมในระบบมีค่า ลดลงมีผลให้ปริมาณแป้งที่เจลาทิไนซ์มีปริมาณลดลง แต่เหลือ ส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มากกว่า ซึ่งมีแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์มี โครงสร้างของเม็ดแป้งที่แข็งแรง ดังนั้น โอกาสของการหลุดออกจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชบางส่วนของแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ รวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถละลายได้ในน้ำ เช่น โปรตีนหรือแร่ธาตุ เป็นต้น มีโอกาสการ หลุดออกน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณของแป้งที่ละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณต่ำ ส่งผลให้ค่า WSI มีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิบารเลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเด็ยมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วง ของความชื้นที่จัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงกลาง เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 50% ทำให้ ค่า T_m ของสตาร์ชลดลง (Roos, 1995) ทำให้ปริมาณการเกิดเจลาทิไนซ์ของสตาร์ชมีค่าสูงขึ้น ส่งผล ให้ที่สภาวะการทดลองของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีสัดส่วนของแป้งที่เจลาทิไนซ์มากกว่าส่วนที่ ไม่เจลาทิไนซ์ มีผลให้โอกาสการหลุดออกจากโครงสร้างของสตาร์ชบางส่วน รวมถึงองค์ประกอบ โปรตีนและแร่ธาตุของแป้งที่เจลาทิไนซ์มีมากกว่าแป้งที่ไม่เจลาทิไนซ์ซึ่งมีผลให้ค่า WSI ของเอกซ์ ทรูเดตที่ความชื้น 50% มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 35%

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเด็ยที่ผ่านการแปรรูป ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันจากปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิบารเล พบว่ ที่ความชื้น 35 และ 50% เมื่อ อุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ไปสู่ระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้นถึงระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ค่า WSI มีค่า เพิ่มขึ้นที่ความชื้นของวัตถุดิบที่ 20 และ 35% แต่ที่ความชื้น 50 % ค่า WSI มีค่าลดลง การเพิ่มขึ้น ของค่า WSI เมื่ออุณหภูมิบารเลเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำถึงระดับสูงของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 20 และ 35% เนื่องจากอุณหภูมิบารเลที่เพิ่มขึ้นมีผลให้พลังงานรวมในระบบมากขึ้น ปริมาณแป้งที่

เจลาทีนซีมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีผลให้สัดส่วนของของแข็งที่สามารถหลุดออกจากโครงสร้างมีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% เมื่ออุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งค่า WSI เพิ่มขึ้น แต่หากเพิ่มอุณหภูมิต่อมีผลให้ค่า WSI มีค่าลดลงนั้น โดยปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่สูง มีส่วนช่วยทำให้พลังงานในระบบมีค่าลดลงได้มากกว่าที่ระดับความชื้นอื่นถึงแม้ว่าอุณหภูมิบาร์เรลจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า WSI ในช่วงอุณหภูมิระดับต่ำถึงกลางเนื่องจากส่วนของแป้งที่เจลาทีนซีมีปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นผลให้โอกาสการหลุดออกจากโครงสร้างสตาร์ชและปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้นอีกมีผลให้สตาร์ชเกิดการกระบวนการเดกซ์ทริไนเซชัน (dextrinization) ทำให้โมเลกุลสตาร์ชมีขนาดเล็กลงและสามารถรวมตัวกันได้ ซึ่งทำให้ปริมาณสตาร์ชบางส่วนที่หลุดออกจากโครงสร้างมีปริมาณลดลงเป็นเหตุให้ค่า WSI มีค่าลดลง (Ding, Ainsworth, Plunkett, Tucker และ Marson, 2006)

5.3.3 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อลักษณะโครงสร้างผลึก

ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อลักษณะโครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของแป้งลูกเดือย แสดงในภาพที่ 23 และตารางที่ 17 พบว่า การแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้



ภาพที่ 23 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (LT = low barrel temperature MT = medium barrel temperature และ HT = high barrel temperature)

โครงสร้างผลึก (crystalline structure) ของแป้งลูกเดี๋ยถูกทำลายเนื่องจากความร้อนและแรงทางกล นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่า ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิบารเรลดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) โครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดี๋ยที่สภาวะการทดลองนี้ถูกทำลายน้อยที่สุด เนื่องจากจากภาพที่ 23 ยังคงเห็นลักษณะ โครงสร้างผลึกที่มี X-ray diffraction pattern คล้ายคลึงกับของวัตถุดิบ ซึ่งเมื่อคำนวณปริมาณผลึก พบว่า ปริมาณผลึกของแป้งลูกเดี๋ยที่สภาวะการทดลองนี้มีปริมาณลดลง 3 เท่า เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (ตารางที่ 17) เนื่องจากที่ สภาวะการทดลองนี้มีค่า DG น้อยที่สุด (48.88%) หรือคือแป้งหรือสตาร์ชถูกเจลาทิไนซ์น้อยที่สุดทำให้ยังคงเหลือส่วนแป้งที่ไม่ถูกเจลาทิไนซ์ ซึ่งยังคงแสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกของสตาร์ชได้ ในขณะที่อุณหภูมิบารเรลดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ลักษณะ โครงสร้างผลึกถูกทำลายทั้งหมด ดังจะเห็นจากภาพที่ 23 ที่แสดงเฉพาะส่วนของอสัณฐาน (amorphous) แม้ว่าที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิระดับกลางและสูงจะยังคงเหลือส่วนของแป้งที่ไม่ถูกเจลาทิไนซ์บางส่วน แต่ส่วนที่ยังคงเหลือนี้ไม่อาจแสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกได้ เนื่องจากส่วน

ตารางที่ 17 ปริมาณผลึกของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

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

ที่เหลืออยู่นี้เป็นส่วนของออสติเนียนของสตาร์ช ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Chang, Bustos และ Lara (1998) ที่รายงานว่า ความกว้างของหัว die (slit die) อัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ (feed rate) อุณหภูมิ บารเรล และความเร็วของสกรูจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีผลทำให้โครงสร้างผลึกของเอกซ์ทรูเดตจาก สตาร์ชข้าวโพดถูกทำลาย ซึ่งความเร็วของสกรูมีผลในการทำลายโครงสร้างสตาร์ชมากที่สุด งานวิจัยของ Charbonniere, Duprat และ Guilbot (1973) เกี่ยวกับการเปลี่ยน โครงสร้างทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต จากสตาร์ชต่าง ๆ พบว่า สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมัน ลำปะหลังและสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวถูกทำลายทั้งหมด แต่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชมันลำปะหลังและสตาร์ชข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวถูกทำลายเพียงบางส่วน งานวิจัยของ Kadan และ Pepperman (2002) ซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชจากเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว พบว่า รูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ของสตาร์ชจากเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวถูกทำลายทั้งหมดหลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ความชื้น 20% อุณหภูมิของบารเรลมากกว่า 110 องศาเซลเซียส และที่ความชื้นของวัตถุดิบเดียวกันนี้ แต่อุณหภูมิ ของบารเรลอยู่ในช่วง 70-90 องศาเซลเซียส จะยังคงสามารถเห็นรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ของ สตาร์ชจากเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว

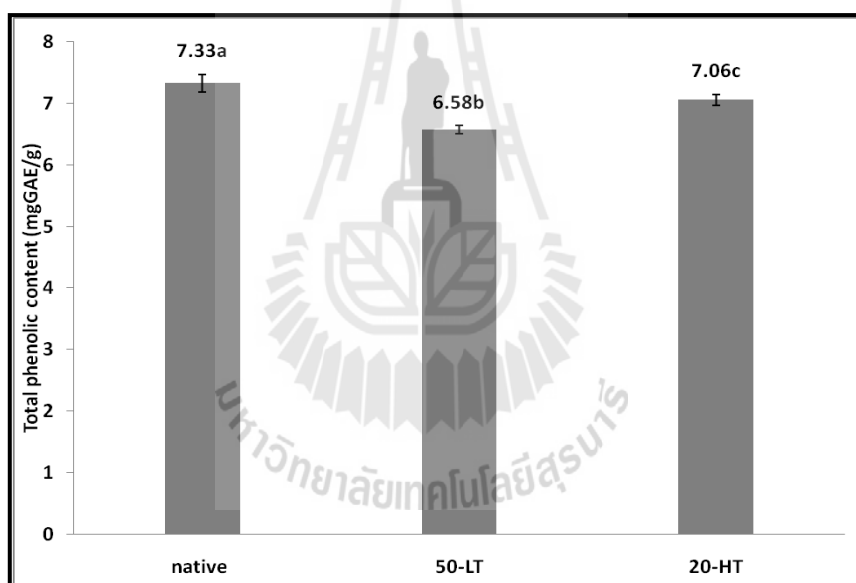
5.4 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อ antioxidant properties

การวิเคราะห์ antioxidant properties ของแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ ทรูชันทำการเลือกสภาวะการทดลองของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือย ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่ 2 สภาวะการทดลองนี้เป็นสภาวะการทดลองที่ให้ระดับความรุนแรงกับ แป้งลูกเดือยที่ระดับสูงสุดและต่ำสุด

5.4.1 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content) ของ methanolic extracts ของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะ การทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิ บารเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แสดงดังภาพที่ 24 พบว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน ส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ 2 สภาวะการทดลองนี้ พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ของ 2 สภาวะการทดลองมีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่ามากกว่าที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในแป้งลูกเดือยที่ผ่าน และไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยนี้อาจเกิดเนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่เป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเฉือน และแรงกลในการแปรรูปแต่ใช้ระยะเวลาในการแปรรูปที่สั้น ซึ่งระยะเวลาการแปรรูปที่สั้นนี้จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่อยู่ในแป้งลูกเดือยเพียงเล็กน้อย โดยผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sensoy, Rosen, Ho และ Karwe (2006) ที่รายงานว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้ง buckwheat ที่อุณหภูมิหัว die ที่ 170 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในเอกซ์ทรูตจากแป้งลูกเดือย



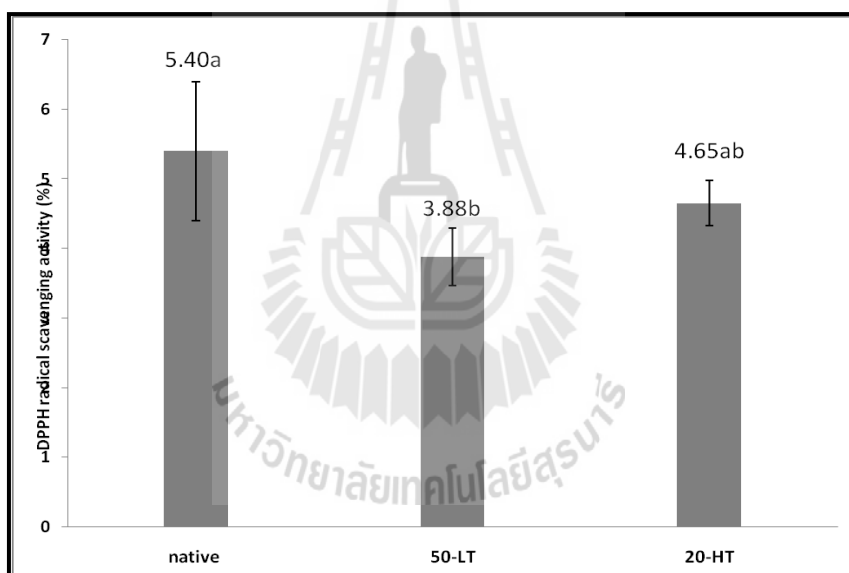
ภาพที่ 24 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดือยและเอกซ์ทรูตจากแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) (LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature) ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) อาจเกิดเนื่องจากปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ถูกทำลายด้วยความร้อนที่ให้อุณหภูมิบารระหว่างการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชัน เช่นเดียวกับเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) แต่ก็มีสารประกอบฟีนอลิกบางส่วนที่เกิดเพิ่มขึ้นมาในระหว่างการแปรรูป โดยที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เป็นสภาวะการทดลองที่มีความรุนแรงที่สูงกว่าที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เป็นผลให้ในระหว่างการแปรรูปของเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) เกิดสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเกิดเนื่องจากการตัดพันธะของสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในรูป conjugated กับสารประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำตาล โพลีแซกคาไรด์ เอมีน (amine) สารประกอบแอลกอฮอล์สายยาว (long-chain alcohol) กลีเซอรอล หรือกรดไขมันสายยาว (long chain fatty acid) เป็นต้น (Nacz และ Shadihi, 2006) ส่งผลให้เกิดสารประกอบฟีนอลิกในรูปอิสระ (free phenolic acid) ที่มากกว่าเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) จึงเป็นเหตุให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของเอกซ์ทราคต์ที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส)

5.4.2 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราคชันต่อ DPPH radical scavenging activity

ภาพที่ 25 แสดง DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของเอกซ์ทราคต์จากแป้งลูกเดือยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชัน ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) พบว่า DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) กับแป้งลูกเดือยไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชัน แต่ DPPH radical scavenging activity ของแป้งลูกเดือยที่ผ่านการแปรรูปที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) กับแป้งลูกเดือยไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันมีค่าแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบ DPPH radical scavenging activity ของเอกซ์ทราคต์จาก 2 สภาวะการทดลองนี้ พบว่า DPPH radical scavenging activity ของเอกซ์ทราคต์จาก 2 สภาวะการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sensoy และคณะ (2006) ที่รายงานว่า กระบวนการเอกซ์ทราคชันของแป้ง buckwheat ที่อุณหภูมิหัว die ที่ 170 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า DPPH radical scavenging activity ผลที่เกิดขึ้นของ DPPH

radical scavenging activity ของลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ไม่แตกต่างจากแป้งลูกเดือยที่ไม่ผ่านการแปรรูป เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเหวี่ยงและแรงกลในการแปรรูป ที่ใช้ระยะเวลาสั้น ถึงแม้เป็นวิธีการแปรรูปด้วยความร้อนที่ค่อนข้างรุนแรงแต่ด้วยระยะเวลาในการแปรรูปที่สั้นจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity ที่อยู่ในแป้งลูกเดือยหรือมีผลเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้จากข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า DPPH radical scavenging activity ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ดังที่งานวิจัยของ Butsat และคณะ (2009) ที่รายงานไว้ว่า ความแตกต่างของ DPPH radical scavenging activity ในแต่ละส่วน (รำ เปลือก ข้าวกล้องและแป้งข้าว (milled rice)) ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ค่าความแตกต่างของ DPPH radical scavenging activity ในแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันและของเอกซ์ทรูเดทที่ 2 สภาวะการทดลองนี้เพียงเล็กน้อย



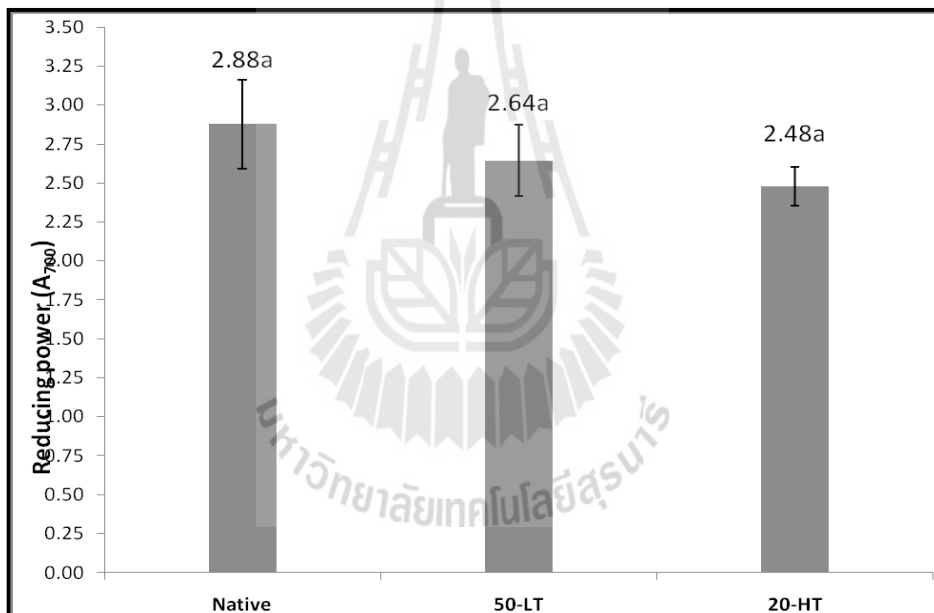
ภาพที่ 25 DPPH radical scavenging activity ของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดือยและเอกซ์ทรูเดทจากแป้งลูกเดือยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบารเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบารเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) (LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature) ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แม้ว่าผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่าไม่แตกต่างกันนั้น อาจเกิดเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์ทั้ง 2 สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน แต่การเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity อาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก เพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้ไฮโดรเจนอะตอมของสารประกอบฟีนอลิก หรือสารประกอบประเภทอื่น ๆ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (hydroxyl group) เช่น กรดอะมิโน เป็นต้น กับอนุมูลของ DPPH• ด้วยเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบ DPPH จากสีม่วงเป็นสีเหลือง (Prakash, 2001; Sensoy และคณะ, 2006) แต่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอาจสามารถที่จะนำมาบอกถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง DPPH radical scavenging activity ได้เช่นกัน เช่น ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของเอกซ์ทราคต์ที่สภาวะการทดลองที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิบารลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าเอกซ์ทราคต์ที่ความเข้มข้น 50% อุณหภูมิบารลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) ซึ่ง DPPH radical scavenging activity ของเอกซ์ทราคต์ที่สภาวะการทดลองที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิบารลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าเอกซ์ทราคต์ที่ความเข้มข้น 50% อุณหภูมิบารลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) เช่นกัน

5.4.3 ผลของกระบวนการเอกซ์ทราคชันต่อ reducing power

ภาพที่ 26 แสดง reducing power ของ methanolic extracts ของแป้งลูกเดี๋ยก่อนและหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้น 50% อุณหภูมิบารลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิบารลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ที่ความเข้มข้นของตัวอย่างต่อสารละลายเมทานอลที่ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่า reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบ reducing power ของเอกซ์ทราคต์จาก 2 สภาวะการทดลองนี้พบว่า reducing power ของเอกซ์ทราคต์จาก 2 สภาวะการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่ง reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชันที่ไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องจาก กระบวนการเอกซ์ทราคชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเฉือน และแรงกลในการแปรรูปที่ระยะเวลาสั้น 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 ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกที่มีในตัวอย่างมีผลต่อการแตก เปลี่ยนอิเล็กตรอนและ

อะตอมไฮโดรเจนเพื่อการเปลี่ยนโครงสร้างของ ferric เป็น ferrous ด้วย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของ reducing power ก็ขึ้นกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีในตัวอย่างนั้น ๆ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หา antioxidant properties ด้วยวิธีการ DPPH assay เพราะฉะนั้นการลดลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของเอกซ์ทราคต์ทั้ง 2 สภาวะการทดลองน่าจะให้ reducing power ของเอกซ์ทราคต์มีค่าลดลงด้วยแต่ผลที่ได้พบว่า reducing power ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์มีค่าไม่แตกต่างกัน รวมทั้งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของเอกซ์ทราคต์ทั้ง 2 สภาวะการทดลองให้ผลที่แตกต่างกับผลของ reducing power ในเอกซ์ทราคต์ แสดงให้เห็นว่า reducing power ที่วัดได้จากแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกเพียงอย่างเดียว แต่มีผลขึ้นกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยน อิเล็กตรอน และไฮโดรเจนอะตอมของสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ในตัวอย่างนั้นๆ (Sensoy และคณะ, 2006)



ภาพที่ 26 reducing power ของ methanolic extracts (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของแป้งลูกเดี๋ยและเอกซ์ทราคต์จากแป้งลูกเดี๋ยหลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทราคชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบิบาลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบิบาลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) (LT = low barrel temperature และ HT = high barrel temperature)

ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.5 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อปริมาณ coixenolide

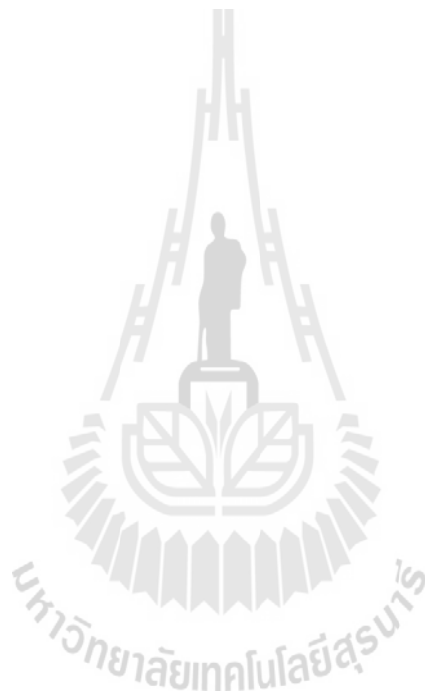
ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปและที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบาเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แสดงในตารางที่ 18 พบว่า หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้ปริมาณ coixenolide มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งลูกเดี๋ยยที่ไม่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ coixenolide ของเอกซ์ทรูเดตแป้งลูกเดี๋ยยที่ 2 สภาวะการทดลองนี้ พบว่า ปริมาณ coixenolide ของเอกซ์ทรูเดตที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบาเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) ซึ่งการที่ปริมาณ coixenolide ในแป้งลูกเดี๋ยยหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นอาจเป็นผลเนื่องจาก กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่อาศัยความร้อน แรงเฉือนและแรงกลส่งผลให้สาร coixenolide สามารถหลุดออกจากโครงสร้างของไขมันสายยาวได้ โดยสาร coixenolide เป็นสารที่ละลายอยู่ในส่วนของไขมันในโครงสร้างของเมล็ด ซึ่งการหลุดออกของสาร coixenolide จากโครงสร้างไขมันอาจเหมือนกับการหลุดออกจากโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกบางประเภทเช่น กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) เป็นต้น โดยการหลุดออกจากโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก เกิดจากการที่พันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น โพลีแซคคาไรด์ เอมีน เป็นต้น ถูกทำลายด้วยการแปรรูปด้วยความร้อน (Naczka และ Shadihi, 2006) ซึ่งการหลุดออกจากโครงสร้างของกรดเฟอร์ูลิกนั้น เช่นในงานวิจัยของ Zielinski, Kozłowska และ Lewczuk (2001) ที่ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ bioactive ในเมล็ดก่อนและหลังการให้ความร้อน ซึ่งได้รายงานไว้ว่า ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์

ตารางที่ 18 ปริมาณ coixenolide ของแป้งลูกเดี๋ยยและเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดี๋ยย หลังผ่านการแปรรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะการทดลองที่ความชื้น 50% อุณหภูมิบาเรลระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) และที่ความชื้น 20% อุณหภูมิบาเรลระดับสูง (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	2,727.04 ± 1.65

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

ข้าวไรย์และข้าวโอ๊ตหลังผ่านกระบวนการเอกซทรวงูชันที่ความชื้น 20% และอุณหภูมิ 120, 160 และ 200 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ปริมาณกรดฟอรูลิกมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในรูปสารประกอบฟีนอลิกอิสระ และ ester bound phenolic acid



บทที่ 4

บทสรุป

ลูกเดือยมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับข้าวสาลี ข้าวโพดและข้าวบาร์เลย์ เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสตาร์ชลูกเดือย พบว่า สตาร์ชลูกเดือยมีลักษณะกลม หลายเหลี่ยม โดยมีขนาดของอนุภาคสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำ เท่ากับ 11.68 และ 12.29 ไมครอนตามลำดับ โครงสร้างผลึกของสตาร์ชลูกเดือยแสดงลักษณะแบบ A สตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวและดำมีการกระจายของสายโซ่ของอะไมโลเพคตินมากที่สุดอยู่ในช่วง DP ที่ 13-24 คือ 49.02 และ 48.65% ตามลำดับ และมีขนาดของสายโซ่อะไมโลเพคตินเฉลี่ย (average CL_n) อยู่ที่ DP 21.01 และ 20.78 ตามลำดับ ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีในเซชันของสตาร์ชลูกเดือย 2 พันธุ์อยู่ในช่วง 63-81 องศาเซลเซียส การเกิดรีโทรเกรเดชันของลูกเดือยใช้ระยะเวลา 39 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และค่าการละลายคุณสมบัติการเกิดเพสท์ทั้งทางด้านความหนืดและอุณหภูมิของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าสูงกว่าพันธุ์ดำ ในขณะที่กำลังการพองตัวของสตาร์ชลูกเดือยพันธุ์ขาวมีค่าต่ำกว่าพันธุ์ดำ

สารที่สกัดได้จากค่างหรือส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำจากเมล็ดลูกเดือยที่ขัดสีแล้ว 2 ชนิด คือ ลูกเดือยพันธุ์ดำและลูกเดือยพันธุ์ขาว มีปริมาณร้อยละ 0.10 และ 0.09 (น้ำหนักแห้ง) มีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกันคือมีส่วนของอะราบีโนไซแลน โปรตีนและแร่ธาตุจำนวนมาก อัตราส่วนของอะราบีโนสต่อไซโลสของอะราบีโนไซแลนมีค่าสูงกว่าธัญชาติชนิดอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าอะราบีโนไซแลนในเนื้อลูกเดือยมีโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาของอะราบีโนสอยู่จำนวนมาก อะราบีโนไซแลนจากลูกเดือยเปลือกสีดำนี้น้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าลูกเดือยเปลือกสีขาว น้ำหนักโมเลกุลมีค่าลดลงเมื่ออะราบีโนไซแลนถูกย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอสแสดงว่าอาจมีพันธะข้ามโควาเลนต์ระหว่างอะราบีโนไซแลนและโปรตีน ส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำสามารถลดแรงตึงผิวของน้ำได้ พฤติกรรมการไหลของส่วนที่สกัดไม่ได้ด้วยน้ำของลูกเดือยก่อนและหลังย่อยด้วยเอนไซม์มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (ร้อยละ 20) อาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของอะราบีโนไซแลนที่มีลักษณะกิ่งก้านสาขามากรวมตัวกับโปรตีนและแร่ธาตุที่พบในปริมาณสูง การวิเคราะห์ทางเมททีลเลชันแสดงให้เห็นว่าอะราบีโนไซแลนในลูกเดือยทั้ง 2 ชนิดมีพันธะโครงสร้างของอะราบีโนไซแลนที่ไม่มีความแตกต่างกัน อนุพันธ์ Araf มีลักษณะเป็นปลายแขนงหน่วยเดี่ยวที่เกาะอยู่ที่อนุพันธ์ Xylp ที่มีลักษณะเป็นแกนกลาง (Backbone) โดยส่วนใหญ่เกาะที่ตำแหน่ง O-3 ของ Xylp และมีบางส่วนเกาะที่ตำแหน่ง O-2 และ O-3 ของ Xylp

กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยพันธุ์เปลือกขาว พบว่า ลักษณะของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งลูกเดือยขึ้นกับสถานะการ

ทดลอง โดยที่อุณหภูมิ바เรตสูงและความชื้นต่ำมีผลให้ออกซ์ทรูเดตที่ได้มีลักษณะพอง แต่เมื่อความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นที่ทุกอุณหภูมิ바เรต มีผลให้ออกซ์ทรูเดตที่ได้มีลักษณะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งพองตัว ค่า DG ของออกซ์ทรูเดตอยู่ในช่วง 49-91% ซึ่งเมื่อความชื้นสูงขึ้นมีผลให้เกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชมีปริมาณลดลง และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ바เรตเพิ่มขึ้น สภาวะการทดลองด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่ให้กับแป้งลูกเดือยไม่มีผลต่อปริมาณ RDS SDS และ RS ซึ่งปริมาณ RDS มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ SDS มีค่าลดลง และปริมาณ RS ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คุณสมบัติการเกิดเพสท์ของออกซ์ทรูเดต พบว่า ที่ความชื้น 35 และ 50% และที่อุณหภูมิ바เรตระดับกลาง (120 องศาเซลเซียส) และระดับสูง (150 องศาเซลเซียส) แสดงพิกความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ (cold peak viscosity) เนื่องจากเป็นสภาวะการทดลองที่มีค่า DG ค่อนข้างสูงหรือมีปริมาณของแป้งที่เจลลิตีในเซชันปริมาณมาก เป็นผลให้ค่า WAI ที่สภาวะการทดลองนี้มีค่าสูง ค่า WAI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูปยกเว้นที่ความชื้น 20% และค่า WAI ของออกซ์ทรูเดตมีผลมาจากปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิ바เรต ค่า WSI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป ซึ่งค่า WSI ของออกซ์ทรูเดตขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิ바เรต โครงสร้างผลึกของแป้งลูกเดือยถูกทำลาย หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่ที่ความชื้น 35% และอุณหภูมิ바เรตระดับต่ำ (90 องศาเซลเซียส) โครงสร้างผลึกยังคงเหลืออยู่ เนื่องจากเป็นสภาวะการทดลองที่มีค่า DG ต่ำที่สุด antioxidant properties คือ DPPH radical scavenging activity และ reducing power มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันแต่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลง ซึ่ง antioxidant properties ของออกซ์ทรูเดตที่ได้ขึ้นกับสภาวะการทดลอง สำหรับปริมาณ coixenolide ของออกซ์ทรูเดตมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแปรรูป

บรรณานุกรม

- กระทรวงพาณิชย์. (2546). ลูกเดือย [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.moc.go.th/opscenter/lylmun.htm>
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- จักรพรรดิ วุ่นสีแซง. (2546). เดือยข้าวเหนียว. กสิกร 76(2): 98-103.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน. (2530). ลูกเดือย: คุณสมบัติบางประการและผลิตภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐชนก อมรเทวภัทร, เสกสม อาตมางกูร และสายชล เลิศสุวรรณ. (2548). ผลของอัตราการไหล
ของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด. ใน การ
ประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร.
กรุงเทพฯ. หน้า 24-32.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2530). การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ
ของแป้งและสตาร์ชลูกเดือย. วารสารเกษตรศาสตร์(วิทย.) 21: 371-377.
- ทัศนีย์ พรกิจประสาน และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2531). ผลิตภัณฑ์ลูกเดือย. วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย.)
22: 103-109.
- ประชา บุญญสิริกุล. (2539). บทบาทของเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย.
อาหาร. 24(1): 1-12.
- วิไล รังสาดทอง. (2545). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2 สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ.
- ศิริพร จันทนา. (2529). การใช้แป้งลูกเดือยในการทำนมจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Al-Othman, A.A., Al-Shagrawi, R. A., Hewedy, F. M., and Hamdi, M. M. (1998). Plasma total,
lipoprotein cholesterol, organs cholesterol and growth performance in rats fed dietary
gum arabic. **Food Chemistry**. 62 (1): 69-72.
- 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.

- Åman, P. and Westerlund, E. (1996). Cell wall polysaccharides: structural, chemical, and analytical aspects. In A-C. Eliasson (ed.). **Carbohydrates in Food** (pp191-226). Marcel Dekker, Inc. New York.
- 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.
- Anderson, J.W. and Tietzen-Clark, J. (1986). Dietary fiber: Hyperlipidemia, hypertension and coronary heart disease. **American Journal of Gastroenterology.** 81: 907-919.
- Annison, G., Choct, M., and Cheetham, N.W. (1992). Analysis of wheat arabinoxylans from a large-scale isolation. **Carbohydrate Polymers.** 19: 151-159.
- AOAC. (1997). **Official Methods of Analysis** (16th ed.). Washington DC, USA: Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis** (17th 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.
- Arora, R.K. (1977). Job's tears (*Coix lacryma-jobi*) A minor Food and Fodder Crop from North Eastern India. **Econ. Bot.** 31: 358-366.
- Bender, D.A. and Bender A.E. (1999). Benders' Dictionary of Nutrition and Food Technoloty, 17th edn. Woodhead Publishing, Abington.
- Bengtsson, S. and Åman, P. (1990). Isolation and chemical characterization of water-soluble ambinoxylans in rye grain. **Carbohydrate Polymers.** 12: 267-277.
- Bhandari, B., D'Arcy, B. and Young, G. (2001). Flavour retention during high temperature short time extruion 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.
- Blumenkrantz, N. and Asboe-Hansen, G. (1973). New method for quantitative determination of uronic acids. **Analytical Biochemistry.** 54: 484-489.

- Brouns, F., Kettlitz, B. and Arrigoni, E. 2002. Resistant starch and the butyrate revolution. **Trends in Food Science and Technology**. 13:251-261.
- 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
- Butsat, S., N. Weerapreeyakul and S. Siriamornpun, 2009. Changes in phenolic acids and antioxidant activity in Thai rice husk at five growth stages during grain development. **J. Agric. Food Chem.**, 57: 4566-4571.
- Carpita, N. C. and Shea, E. M. (1989). Linkage structure of carbohydrates by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) of partially methylated alditol acetates. In C.J. Bierman and G.D. McGinnis (eds.). **Analysis of Carbohydrates by GLC and MS** (pp 157-216). Boca Raton: CRC Press.
- Carter, J.W., Hardman, W.E., Heitman, D.W., and Cameron I.L. (1998). Type and amount of individual dietary fibers on: serum lipid profiles, serum glucose concentration and energy intake in rats. **Nutrition Research**. 18 (10): 1743-1756.
- Chang, H-C., Huang, Y-C., and Hung, W-C. (2003). Antiproliferative and chemopreventive effects of adlay seed on lung cancer in vitro and in vivo. **J. Agric. Food Chem.** 51: 3656-3660.
- Chanvrier, H., Uthayakumar, 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.
- 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.
- Chiang, B.-Y., and Johnson, J. A. (1997). Gelatinization of Starch in Extruded Products. **Cereal Chem.** 54:436.
- 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.

- Choi, J.H., B.H. Jung, O.H. Kang, H.J. Choi and P.S. Park *et al.*, 2006. The anti-inflammatory and anti-nociceptive effects of ethyl acetate fraction of *Cynanchi paniculati* Radix. **Biol. Pharm. Bull.**, 29: 971-975.
- 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.
- 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.
- Ciucanu, I. and Kerek, F. (1984). A simple and rapid method for the permethylation of carbohydrates. **Carbohydrate Research.** 131: 209–217.
- Cui, S.W. (2001). **Polysaccharide Gums from Agricultural Products: Processing, Structure & Functionality** (pp 103-228). Technomic Publishing Co., Inc.
- Cui, S.W. (2005). Structural analysis of polysaccharides. In S.W. Cui (ed.). **Food Carbohydrates** (pp 105-160). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Cui, W., Wood, P.J., Weisz, J., and Beer, M.U. (1999). Nonstarch polysaccharides from preprocessed wheat bran: carbohydrate analysis and novel rheological properties. **Cereal Chemistry.** 76 (1):129-133.
- Debon, S.J.J. and Tester, R.F. (2001). In vitro binding of calcium, iron and zinc by non-starch polysaccharides. **Food Chemistry.** 73: 401-410.
- Delaney, B., Carlson, T., Srazer, S., Zheng, T., Hess, R., Ostergren, K., Kierzek, K., Haworth, J., Knutson, N., Junker, K., and Jonker, D. (2003). Evaluation of the toxicity of concentrated barley β -glucan in a 28-day feeding study in wistar rats. **Food and Chemical Toxicology.** 41: 477-487.
- Dervilly, G., Saulnier, L., Roger, P., and Thibault J.-F. (2000). Isolation of homogeneous from wheat water-soluble arabinoxylans. Influence of the structure on their macromolecular characteristics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 48: 270-278.

- Dervilly-Pinel, G., Rimsten, L., Saulnier, L., Andersson, R., and Åman, P. (2001). Water-extractable arabinoxylan from pearled flours of wheat, barley, rye and triticale. Evidence for the presence of ferulic acid dimers and their involvement in gel formation. **Journal of Cereal Science**. 34: 207–214.
- 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.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., and Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**. 28: 350-356.
- Duke, J.A. (1983). **Handbook of Energy Crops** [On-line]. Available: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Coix_lacryma-jobi.html.
- Ebringerová, A., Hromádková, Z., and Berth, G. (1994). Structural and molecular properties of a water-soluble arabinoxylan-protein complex isolated from rye bran. **Carbohydrate Research**. 264: 97-109.
- Ebringerová, A., Hromádková, Z., Petráková, E., and Hricovíni, M. (1990). Structural features of a water-soluble L-arabino-D-xylan from rye bran. **Carbohydrate Research**. 198: 57-66
- Eerlingen, R.C. and Deldour, J.A. 1995. Formation, Analysis, Structure and Properties of TypeIII Enzyme Resistant Starch. **Journal of Cereal Science**. 22:129-138.
- Encyclopedia Britannica, New. (1997). Vol. 6 15th edn. **Micropedia Ready Reference**.
Encyclopedia Britannica, Inc. USA.
- 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.
- 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.
- Fincher, G.B. and Stone, B.A. (1986). Cell walls and their components in cereal grain technology. In Y. Pomeranz (ed.). **Advances in Cereal Science and Technology, Vol. 8** (pp 207-295). American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN.

- Fulgoni, V.L. (2001). Effect of psyllium on serum cholesterol levels. In B.V. McCleary and L. Prosky (eds.). **Advanced dietary fibre technology**. (pp 221-225). Blackwell Science Ltd.
- Gibbs, W.W. (1998). **Healing cancer. Scientific American**. 279(3): 40-41.
- Girhammar, U., Nakamura, M., and Nair, B.M. (1986). Water soluble pentosans from wheat and rye – Chemical composition and some physical properties in solution. In G.O. Phillips, D.J. Wedlock, and P.A. Williams (eds.). **Gums and Stabilisers for the Food Industry 3** (pp 123-134). Elsevier applied science publishers Ltd., England.
- Girhammar, U. and Nair, B.M. (1992). Certain physical properties of water-soluble non-starch polysaccharides from wheat, rye, triticale, barley and oats. **Food Hydrocolloids**. 6: 329–343.
- 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.
- 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**.
- Gruppen, H., Marseille, J.P., Voragen, A.G.J., Hamer, R.J., and Pilnik, W. (1989). Mild isolation of water-insoluble cell-wall material from wheat flour: Composition of fractions obtained with emphasis on non-starch polysaccharides. **Journal of Cereal Science**. 9: 247-260.
- Gruppen, H., Hamer, R.J., and Voragen, A.G.J. (1992). Water-unextractable cell wall material from wheat flour. 1. Extraction of polymers with alkali. **Journal of Cereal Science**. 16: 41-51.
- Gubler, F., Ashford, A.E., Bacic, A., Blakeney, A.B., and Stone, B.A. (1985). Release of ferulic acid esters from barley aleurone. II. Characterization of the feruloyl compounds released in response to GA₃. **Australian Journal of Plant Physiology**. 12: 307-317.
- Gubler, F., Ashford, A.E., Bacic, A., Blakeney, A.B., and Stone, B.A. (1985). Release of ferulic acid esters from barley aleurone. II. Characterization of the feruloyl compounds released in response to GA₃. **Australian Journal of Plant Physiology**. 12: 307-317.

- 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.
- Harper, J. M. (1981). **Extrusion of food**. Vol. I. CRC Press Florida.
- 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.
- Hizukuri, S. (1986). Starch : analytical aspect In A.C. Eliasson (ed.). **Carbohydrate in Food**. (pp. 347-429). New York: Marcel Dekker.
- Hoffmann, R.A., Kamerling, J.P., and Vliegthart, J.F.G. (1992). Structural features of a water-soluble arabinoxylan from the endosperm of wheat. **Carbohydrate Research**. 226: 303-311.
- Hoffmann, R.A., Roza, M., Maat, M., Kamerling, J.P., and, Vliegthart, J.F.G. (1991). Structural Characteristics of the warm-water-soluble arabinoxylans from the tailings of the soft wheat variety Kadet. **Carbohydrate Polymers**. 16: 275-289.
- Holm, J., Bjorck, I., Ostrowska, S., Eliasson, A. C., Asp, N. G., Larsson, 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.

- Hoseney, R.C. (1986). **Principles of Cereal Science and Technology**. AACC, Inc. St. Paul, Minnesota, USA.
- Hsu, H-Y., Lin, B-F., Lin, J-Y., Kuo, C-C., and Chiang, W. (2003). Suppression of allergic reactions by dehulled adlay in association with the balance of Th1/Th2 cell responses. **J. Agric. Food Chem.** 51: 3763-3769.
- Huggins, M.L. (1942). The viscosity of dilute solutions of linear chain molecules IV. Dependence on concentration. **Journal of American Chemical Society.** 64: 2716-2722.
- 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.
- Izydorczyk, M.S. and Biliaderis, C.G. (1992). Influence of structure on the physicochemical properties of wheat arabinoxylan. **Carbohydrate Polymers.** 17: 237-247.
- Izydorczyk, M.S., Macri, L.J., and MacGregor, A.W. (1998). Structure and physicochemical properties of barley non-starch polysaccharides-II. Alkali- extractable β -glucans and arabinoxylans. **Carbohydrate Polymers.** 35: 259- 269.
- 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.
- 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.
- Kahlon, T.S. (2003). Cholesterol lowering with grain fractions. **Getreide Mehl Und Brot.** 57: 279-191.
- Kalra, J. and Jood, S. (2000). Effect of dietary barley β -glucan on cholesterol and lipoprotein fractions in rats. **Journal of Cereal Science.** 31: 141-145.
- 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. O., Yun, S-J., Jung, B., Lee, E.H., Hahm, D-H., Shim, I., and Lee, H-J. (2004). **Hypolipidemic effects of crude extract of adlay seed (*Coix lachrymajobi* var. *mayuen*) in obesity rat fed high fat diet : Relations of TNF-a and leptin mRNA expressions and serum lipid levels** *Life Sci.* 75: 1391–1404.
- Kraemer, E.O. (1938). Molecular weights of celluloses and cellulose derivatives. **Industrial and Engineering Chemistry.** 30: 1200–1203.
- Kuo, C-C., Shih, M-C., Kuo, Y-H., and Chiang, W. (2001). Antogonism of free-radical – induced damage of adlay seed and its antiprolifratve effect in human histolytic lymphoma U237 monocytic cells. **J. Agric. Food Chem.** 49: 1564-1570.
- Lai, V. M.-F., Lu, S. and Lii, C.-Y. (2000). Molecular characteristics influencing retrogradation kinetics of rice amylopectins. **Cereal Chem.** 77: 272-278.
- Li, J., and Corke, H. (1999). Physicochemical properties of normal and waxy Job’s tears (*Coix lachrymal-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.
- Lolas, G.M., Palamidis, N., and Markakis, P. (1976). The phytic acid-total phosphorus relation in barley, oats, soybeans and wheat. **Cereal Chemistry.** 53: 867-871.
- Lopez, H.W., Levrat, M-A., Guy, C., Messenger, A., Demigné, C., and Rémésy, C. (1999). Effects of soluble corn bran arabinoxylans on cecal digestion, lipid metabolism, and mineral balance (Ca, Mg) in rats. **The Journal of Nutritional Biochemistry.** 10: 500-509.
- Lott, J.N.A., and Ockenden, I. (1986). The fine structure of phytate-rich particles in plants. In E. Graf (ed.). **Phytic Acid: Chemistry and Applications** (pp 43-55). Minneapolis, MN: Pilatus Press.
- 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.

- Meuser, F. and Suckow, P. (1986). Nonstarch polysaccharides. In J.M.V. Blanshard, P.J. Frazier, and T. Galliard (eds.). **Chemistry and Physics of Baking** (pp 42). The Royal Society of Chemistry: London.
- Naczek, M. and Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereals, fruits and vegetables: occurrence, extraction and analysis. **J. Pharmaceut. Biomed. Anal.** 41: 1523-1542.
- Nagao, T., Otsuka, H., Kohda, H., Sato, T., and Yamasaki, K. (1985). Benzoxazinone from *Coix Lacrym-jobi* L.var. ma-yuen. **Phytochemistry.** 24: 2959-2962.
- Nandini, C.D. and Salimath, P.V. (2002). Structural features of arabinoxylans from Bajra (pearl millet). **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 50: 6485-6489.
- Neukom, H. and Markwalder, H. (1975). Isolation and characterization of an arabinogalactan from wheat flour. **Carbohydrate Research.** 39: 387-389.
- Nilsson, M., Saulnier, L., Andersson, R., and Åman, P. (1996). Water unextractable polysaccharides from three milling fractions of rye grain. **Carbohydrate Polymers.** 30: 229-231.
- Noosuk, P., Hill, S. E., Pradipasena, P. and Mitchell, J. R. (2003). Structure-viscosity relationships for Thai rice starches. **Starch/Stärke** 55: 337-344.
- Numata, M., Yamamoto, A., Moribayashi, A. and Yamada, H. (1994). Antitumor components isolated from the Chinese herbal medicine *Coix Lacrym-jobi*. **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.
- 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.
- Osundahunsi O.F., Fagbemi, T.N. Kesselman E. And Shimoni, E. (2003). Comparison of the physicochemical properties and pasting characteristics of flour and starch from Red and white sweet potato Cultivars. **J. Agric. Food Chem.** 51: 2232 – 2236.
- 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 Lacrym-jobi*. **J. Agric. Food Chem.** 38: 631-635.

- 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.
- 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.
- Purseglove, J.W. (1972). Tropical Crops Monocotyledons. **Longman Scientific Technical.** p 134-135.
- Rattan, O., Izydorczyk, M.S., and Biliaderis, C.G. (1994). Structure and rheological behaviour of arabinoxylans from Canadian bread wheat flours. **Lebensmittel-Wissenschaft-und-Technologie.** 27: 550–555.
- Roland, I. (2001). Non-digestible carbohydrates and gut function: Implications for carcinogenesis. In B.V. McCleary and L. Prosky (eds.). **Advanced dietary fibre technology.** (pp 226-231). Blackwell Science Ltd.
- 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.
- Russell, J. and Bass, P. (1985). Canine gastric emptying of fiber meals: influence of meal viscosity and antroduodenal motility American journal of physiology. **Gastrointestinal and Liver Physiology.** 12: G662-G667.
- 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.
- 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., 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.

- Scalbert, A., Monties, B., Lallemand, J.Y., Guittet, E.R., and Rolando, C. (1985). Ether linkage between phenolic acids and lignin fractions of wheat straw. **Phytochemistry**. 24: 1359-1362.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 99 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.
- Spiller, G.A. (1993). **Handbook of Dietary Fiber in Human Nutrition**. (2nd ed.). CRC Press, Inc.
- 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.
- Storsley, J.M., Izydorczyk, M.S., You, S., Biliaderis, C.G., and Rossnagel, B. (2003). Structure and physicochemical properties of β -glucans and arabinoxylans isolated from hull-less barley. **Food Hydrocolloids**. 17: 831-844.
- Sudheesh, S. and Vijayalakshmi, N.R. (1999). Lipid-lowering action of pectin from *Cucumis sativus*. **Food Chemistry**. 67: 281-286.
- Takahashi, M., Konno, C., and Hikino, H. (1986). Isolation and hypoglycemic activity of coixan A, B, C, glycans of *Coix Lacrym-jobi* L.var. ma-yuen seed. **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.
- 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 monascol adlay. **Food Chem.** 97: 375-381.
- Ukita, T., and Tanimura, A. (1961). Studies on the antitumor components in the seeds of *Coix Lacrym-jobi* L.var. ma-yuen (Roman) Stapf. I. Isolation and antitumor activity of coixenolide. **Chem. Pharm. Bull.** 9: 43-46.
- 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.
- Vasanthan Thava, Jiang Gaosong, Yeung Judy, et al. (2002). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking[J]. **Food Chemistry.** 77: 35-40.
- Vinkx, C.J.A., Nieuwenhove, C.G., and Delcour, J.A. (1991). Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. III. Oxidative gelation of a fraction containing water-soluble pentosans and proteins. **Cereal Chemistry.** 68 (6): 617-622.
- Vinkx, C. J. A., Stevens, I., Gruppen, H., Grobet, P.J., and Delcour, J.A. (1995). Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. VI. Variability in the structure of water-unextractable arabinoxylans. **Cereal Chemistry.** 72 (4): 411-418.
- Wang, Q., Wood, P.J., Huang, X., and Cui, W. (2003). Preparation and characterization of molecular weight standards of low polydispersity from oat and barley (1 → 3) (1 → 4) β-D-glucan. **Food Hydrocolloids.** 17: 845-853.
- Wang, W., Onnagawa, M., Yoshie, Y., and Suzuki, T. (2001). Binding of bile salts to soluble and insoluble dietary fibers of seaweeds. **Fisheries Science.** 67: 1169-1173.
- Westerlund, E., Andersson, R., and Åman, P. (1993). Isolation and chemical characterization of water-soluble mixed-linked β-glucans and arabinoxylans in oat milling fractions. **Carbohydrate Polymers.** 20: 115-123.

- Wood, P.J., Weisz, J., and Blackwell, B.A. (1991). Molecular characterization of cereal β -D-glucans, structural analysis of oat glucan and rapid structural evaluation of β -D-glucans from different sources by HPLC of oligosaccharides released by lichenase. **Cereal Chemistry**. 68: 31–39.
- Wood, P.J., Weisz, J., and Blackwell, B.A. (1994). Structural studies of (1-3),(1-4)- β -D-glucans by ^{13}C -nuclear magnetic resonance spectroscopy and by rapid analysis of cellulose-like regions using high-performance anion-exchange chromatography of oligosaccharides released by lichenase. **Cereal Chemistry**. 71: 301-307.
- Wu, T.-T., Charles, A. L. and Huang, T.-Z. (2007). Determination of the contents of the main biochemical compounds of adlay (*Coix lacryma-jobi* L). **Food Chem**. 104: 1509-1515.
- Yamada H., Yanahira, S., Kiyohara, H., Cyong, J.-C., and Otsuka, Y. (1987). Characterization of anti-complementary acidic heteroglycans from the seed of *Coix lacryma-jobi* var. ma-yuen. **Phytochemistry**. 26 (12): 3269-3275.
- 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.
- 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.
- Zielinski, H., Kozłowska, H. Lewczuk, B. (2001). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. **Innovat. Food Sci. Emerg. Tech**. 2: 159-16.
- 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.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

วิธีการ

1. ออบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105°C นาน 2-3 ชั่วโมง นำออก จากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและ บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใสลงในภาชนะหาความชื้นที่ทราบน้ำหนัก ที่แน่นอนแล้ว

3. ออบตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิ 105°C นาน 5-6 ชั่วโมง

4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ใสไว้ในโถดูดความชื้น รอจนกระทั่งอุณหภูมิ ของภาชนะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนัก

5. คำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

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

2. ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2000)

วิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อ ให้มิดชิดใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน

2. ใส่สารผสมคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) และ โพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) 5 กรัม (อัตราส่วนระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมซัลเฟต 1 : 10) เพื่อเร่งปฏิกิริยา

3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄) ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดโฟม (anti-foaming agent) 4-5 หยด

4. ย่อยตัวอย่างบนเตาเครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380°C จนได้สารละลายใส ปล่อยให้ เย็น

5. จัดอุปกรณ์การกลั่น แล้วเปิดสวิตซ์ไฟ และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น

6. ใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุกรดบอริก (ความเข้มข้น 4%) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และน้ำซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด เรียบร้อยแล้ว ไปรับรองของเหลวที่กลั่นโดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควมแน่นจุ่มลงในสารละลายกรดนี้

7. กำหนดให้เครื่องเติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% โดยน้ำหนัก และทำการกลั่นที่ประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควมแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ

8. ไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้กับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสีของสารละลายเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีม่วง

9. ทำ blank และปฏิบัติตามข้อ 1-8 โดยไม่เติมตัวอย่าง

10. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตร

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

เมื่อ A = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรกรดที่ใช้ไตเตรตกับ blank (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)

F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25

W = น้ำหนักตัวอย่างที่เริ่มต้น (กรัม)

ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ / การประชุมระดับชาติและนานาชาติ

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2009. Effect of extrusion parameters on starch digestion and physicochemical properties of Job's Tear (*Coix lacryma jobi* L.) flour. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical properties of waxy and high amylose rice flour during storage. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2009. Comparative effect of different temperature cycling on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Boonna, S. 2009. Physical modification of rice flour by extrusion. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Kiatponglar, W. 2009. Impact of enzyme concentration and hydrolysis time on resistant starch formation. Poster presentation in Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.

- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physiochemical and textural properties of high amylose rice during storage. Poster presentation in Food Innovation Asia Conference 2009. June 18-19, 2009. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. Effect of aging condition on resistant starch formation of rice starch. Poster presentation in 2009 IFT Annual Meeting. June 6-9, 2009. Anaheim, CA, USA.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2008. Comparative study on physical properties of waxy and non-waxy rice during storage. Poster presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2008. Effect of starch content and aging temperature on slowly digestible starch and resistant starch formation in debranched rice starch. Oral presentation in The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Apirattanasorn, S., **Tongta, S.**, Cui, S.W., and Wang, Q. 2008. Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable polysaccharides from Job's Tears. *J. Agric. Food. Chem.* 56:8549-8557.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2008. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 1(02):97-104.
- Phoungchandand, S., Bhulaidok, S., Nantachai, K., Woraphuttaporn, W., **Tongta, S.** and Suvannason, V. 2007. Influence of various cereal flours on physical properties of expanded extrudates. *Khon Kaen University Research Journal*. 12(4):431-441.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2007. Effect of drum drying parameters on physical properties of pregelatinized rice flour. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglerp, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and physical properties of enzyme-resistant starch produced from debranched and retrogradation of cassava starch. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of annealing on physicochemical properties of waxy and normal rice starches. Poster presentation in Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2007. Physicochemical and antioxidant properties of Job's Tear Flour. Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. Oral presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice. Poster presentation in The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):195-204.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):185-193.
- Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S.** 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. J. Agric. Food. Chem., 55: 1463-1468.
- Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S.** 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2006. Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. Poster presentation in The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Kiatponglar, W. and K. Sriroth, K. 2004. Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In ' Starch: Progress in Structural studies, Modifications and Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. Poster presentation The 6th Agro-Industrial Conference. May 28-29, 2004. Bangkok, Thailand.

Sottirattanapan, P. and **Tongta, S.** 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate. Suranaree Journal of Science and Technology. 10(3):220-229.

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4266 โทรสาร (044) 22-4150

