



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)

ปริญญา

เทคโนโลยีชีวภาพ

เทคโนโลยีชีวภาพ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งดิบ และแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวที่มีปริมาณ  
แอมิโลสแตกต่างกัน

Development of Granular Cold Water Soluble Starches from Native and Crosslinked  
Rice Starches Having Different Amylose Contents

นามผู้วิจัย นางสาวโรสลาวตี โตะแอ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์กล้าณรงค์ ศรีรอด, D.E. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ, D.Sc. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งดิบ และแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลส  
แตกต่างกัน

Development of Granular Cold Water Soluble Starches from Native and Crosslinked Rice  
Starches Having Different Amylose Contents

โดย

นางสาวโรสลาวตี โต๊ะแอ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)

พ.ศ. 2554

โรสลาวาตี โตะแอ 2554: การพัฒนาแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งดิบ และแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวที่มี ปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ กล้าณรงค์ ศรีรอด, D.E. 140 หน้า

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนากระบวนการผลิตแป้งละลายน้ำเย็นในรูปแบบเม็ดแป้ง ที่เตรียมแป้งเปียกได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อน โดยนำแป้งข้าวแอมิโลสสูง ปานกลาง และต่ำ (ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 39.13, 24.02 และ 9.21 ตามลำดับ) เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีน) มาแขวนลอยในสารละลายเอทานอลด้วยสัดส่วน 1:20 โดยน้ำหนัก และปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ ซึ่งแปรสัดส่วนเป็น 1.0-4.0 โดย น้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส ได้แป้งที่มีค่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นมากกว่าร้อยละ 95 ทั้งนี้ สภาพะในการเตรียมจะแตกต่างกันตามชนิด และสมบัติแป้ง แป้งข้าวแอมิโลสสูง และปานกลาง ที่มีอุณหภูมิ เริ่มต้นของการเกิดเจลาตินในซึ่สูงกว่าแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ (70.27, 63.66 และ 59.36 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เมื่อ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter) จะใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 ขณะที่ แป้ง ข้าวแอมิโลสต่ำต้องเตรียมภายใต้สภาวะที่มีปริมาณน้ำจำกัดเพื่อป้องกันการแตกของเม็ดแป้ง โดยใช้สารละลายเอ ทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 และใช้สัดส่วนของสารละลายต่างเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับแป้งข้าวแอมิโลสสูง และปานกลาง และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สำหรับ แป้งข้าวแอมิโลสต่ำ แป้งละลายน้ำเย็นที่ได้มีปริมาณเถ้า และแอมิโลสสูงกว่าแป้งดิบเล็กน้อย เม็ดแป้งสูญเสีย birefringence เกิดการหลอมเชื่อมติดกัน และมีรูปร่างต่างจากแป้งดิบ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวแอมิโลสสูง และปานกลาง มีโครงสร้างผลึกแบบ V ขณะที่แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวแอมิโลสต่ำมีโครงสร้างผลึกแบบ บอตันฐาน จึงทำให้แป้งละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ต่างจากแป้งดิบที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A โดย เมื่อนำแป้งละลายน้ำเย็นมาละลายน้ำ จะให้ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ใกล้เคียงกับแป้งเปียกของแป้งข้าวชนิดเดียวกันที่เตรียมโดยให้ความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวแอมิโลสสูงมีค่าน้อยมาก และไม่ ปรากฏฟิสิกในแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง และต่ำ ทั้งนี้ มีการเกิดรีโทรเกรเดชันใกล้เคียงกับ แป้งดิบ เมื่อละลายน้ำ และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวทั้ง 3 ชนิด มีความหนืดเริ่มต้นสูงกว่าหรือใกล้เคียงความหนืดสูงสุดของแป้งดิบเมื่อให้ความร้อน ขณะที่ เมื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer พบว่า แป้งเปียกของแป้งละลายน้ำเย็นจะเกิด shear thinning เช่นเดียวกับแป้งเปียกของแป้งดิบที่เตรียมโดยให้ความร้อน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลงขณะแรง เจือนคงที่ ยกเว้น แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวแอมิโลสสูงที่ความหนืดค่อนข้างคงที่ เมื่อนำแป้งครอสลิงค์จาก แป้งข้าวแอมิโลสสูง และต่ำ มาคัดแปรเป็นแป้งละลายน้ำเย็นที่สัดส่วนของแป้งต่อสารละลายเอทานอลเป็น 1:20 โดยน้ำหนัก (ใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 และ 95 ตามลำดับ) และมีสัดส่วนของสารละลายต่างเป็น 12 และ 3.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 °C ให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นร้อยละ 86.56 และ 72.60 ตามลำดับ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวทั้ง 2 ชนิด มีความหนืดทันทีเมื่อละลายน้ำที่ อุณหภูมิ 25 °C โดยมีความคงตัวขณะให้แรงเฉือนนาน 30 นาที

Roselawatee Toae 2011: Development of Granular Cold Water Soluble Starches from Native and Crosslinked Rice Starches Having Different Amylose Contents. Master of Science (Biotechnology), Major Field: Biotechnology, Department of Biotechnology. Thesis Advisor: Associate Professor Klanarong Sriroth, D.E. 140 pages.

Granular cold water soluble (GCWS) rice starches were prepared by an alcoholic-alkaline treatment using three rice starches with different amylose contents (39.13, 24.02 and 9.21%, as determined by a spectrophotometric method for High amylose - HA; Medium amylose - MA and Low amylose - LA rice starches, respectively). To prepare GCWS starches, rice starches were suspended in an aqueous ethanol (1:20 by weight) and mixed with 3M sodium hydroxide (NaOH) solution at different ratios of 1.0-4.0 by weight and temperature (25 and 30 °C). The GCWS rice starches with the maximal cold water solubility (greater than 95%) could be prepared by using different conditions, depending on starch types. The GCWS of HA and MA rice starches having higher onset gelatinization temperatures than the LA rice starch (the onset temperatures as determined by a Differential Scanning Calorimeter were 70.27, 63.66 and 59.36 °C for HA, MA and LA rice starches, respectively) were prepared by using 40% ethanol. In contrast, the preparation of GCWS from LA rice starch had to be performed under the restricted condition of water content, using 95% ethanol, otherwise starch was completely dispersed and did not maintain the granular shape. The amounts by weight ratios of alkali for preparing the GCWS of HA, MA and LA rice starches were 2.0, 2.5 and 3.0, respectively at 25 °C for HA and MA and at 30 °C for LA rice starches. Relatively to native starches, GCWS rice starches contained higher ash and slightly higher amylose contents. No birefringence was observed in GCWS starch granules of which were melted and agglomerated together. Instead of an A-type X-ray pattern found in native rice starches, the GCWS high and medium amylose rice starches exhibited a V-type X-ray pattern while amorphous pattern was observed for GCWS low amylose rice starch. When dissolved in water, the GCWS starches demonstrated similar swelling power, solubility and volume fraction of dispersed phase comparable to cooked paste (at 95 °C, 15 min) of native starches. The thermal analysis by Differential Scanning Calorimeter confirm instant solubility of GCWS rice starches as only small or no enthalpy values could be quantified. The retrogradation of GCWS rice starches were similar to cooked starches. When determined by a Rapid Visco Analyzer, the paste viscosity of GCWS starches was equivalent or higher than peak viscosity of cooked pastes of native starches. The Brookfield analysis of GCWS rice starches exhibited similar paste properties as cooked paste of native starches, i.e. having shear thinning and thixotropic behavior. Dual modification by cross-linking and granular cold water solubility of high and low amylose rice starches were also successfully developed by using the weight ratio of starch and ethanol of 1:20 (40 and 95% ethanol for HA and LA rice starches, respectively) with 12 and 3.5 of 3M NaOH at 25 °C, respectively. Once dispersed in cold water, cross-linked GCWS rice starches provided instantly viscous paste being stable with constant shear over 30 min.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ด้วยพระนามของอัลลอฮ์ผู้ทรงเมตตากรุณาเสมอ มวลการสรรเสริญเป็นสิทธิ์ของพระองค์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กล้าณรงค์ ศรีรอด ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ ดร. เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ กรรมการวิชาเอก ที่ให้คำแนะนำและประสิทธิประสาทวิชาในการวิจัยและการศึกษาตลอดมา ขอขอบคุณ ดร. ปฐมา จาตุกานนท์ และ ดร. สุนีย์ โชตินิรนาท ที่ให้คำแนะนำพร้อมทั้งความช่วยเหลืออย่างดีตลอดการวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคโนโลยี แป้ง น้ำตาล และยางพารา สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือในการวิจัย ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และเป็นกำลังใจอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้มอบทุนโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สำหรับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพ่อแม่ และน้อง ๆ สำหรับกำลังใจที่มีให้เสมอมา และขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง อีกหลายท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ขออัลลอฮ์ทรงตอบแทนความดีงามแก่ทุกท่าน อามีน

โรสลาวาตี โตะแอ

เมษายน 2554

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	39
สรุปผลการทดลอง	122
ข้อเสนอแนะ	124
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	125
ภาคผนวก	134
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	140

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้นร้อยละ 14	5
2	รูปร่าง ขนาด และปริมาณแอมิโลสของเมล็ดแป้งจากพืชชนิดต่าง ๆ	7
3	สมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	17
4	องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง HA, MA และ LA	40
5	สัดส่วนโดยมวล สัดส่วนโดยโมลของแป้ง น้ำ เอทานอล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีการแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH และอุณหภูมิในการเตรียมที่ต่างกัน	45
6	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เถ้า และค่า %CWS ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน	46
7	ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน	49
8	ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน	51
9	สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเจลาตีไนเซชันของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	68
10	สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งรีโทรเกรด HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	73
11	สมบัติความหนืดของ HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	79

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ร้อยละความแตกต่างของความหนืดของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	84
13	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	88
14	สัดส่วนโดยมวล สัดส่วนโดยโมลของแป้ง น้ำ เอทานอล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในการเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เมื่อแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	91
15	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เถ้า และค่า %CWS ของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน	92
16	ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\Phi$ ) ของ HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน	94
17	ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน	95
18	สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเจลาติไนเซชันแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	106
19	สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งรีโทเรกเรด HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	110
20	สมบัติความหนืดของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	114

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	118
22	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยหัวเข็มหมายเลข 27	121

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลส และแอมิโลเพกติน	6
2 โครงสร้างขององค์ประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน	8
3 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C	9
4 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกตินที่ประกอบด้วย 1 คือ ส่วนผลึก และ 2 คือ ส่วน อสัณฐาน	10
5 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	11
6 ลักษณะเม็ดแป้งข้าวโพดจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์	11
7 โครงสร้างภายในเม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างผลึก และส่วนอสัณฐาน ที่ ประกอบกันขึ้นเป็นชั้นแข็ง และชั้นอ่อน	12
8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A, B, C และ V	13
9 ระยะเวลาในการเกิดเจลลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง	15
10 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เมื่อใช้สารผสมแป้งกับน้ำ 30:70 ( $T_o =$ Onset temperature, $T_p =$ Peak temperature)	16
11 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	16
12 การเกิดรีโทรเกรดชัน และกลไกการคืนตัวของแป้ง	19
13 ผลกระทบของแรงเฉือนต่อความหนืดของแป้งดัดแปรเปรียบเทียบกับแป้งดิบ	24
14 สมการการเกิดปฏิกิริยาการดัดแปรแป้งแบบโครสลิงค์โดยใช้ STMP	26
15 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าว	31
16 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าวละลายน้ำเย็น	32
17 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าวครอสลิงค์	33
18 ภาพเม็ดแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และ แสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า	53

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	ภาพเม็คแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า	54
20	ภาพเม็คแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า	55
21	ลักษณะรูปร่างเม็คแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า	57
22	ลักษณะรูปร่างเม็คแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า	58
23	ลักษณะรูปร่างเม็คแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า	59
24	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer	61
25	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer	62
26	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer	63
27	การเกิดเจลลิตีไนเซชันของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	65
28	การเกิดเจลลิตีไนเซชันของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	66
29	การเกิดเจลลิตีไนเซชันของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	67
30	การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	70

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	การเกิดรีโทเกรเดชันของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	71
32	การเกิดรีโทเกรเดชันของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	72
33	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA	76
34	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA	77
35	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA	78
36	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	81
37	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก MA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	82
38	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	83
39	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	85

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง MA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	86
41	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	87
42	ภาพเม็ดแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และแสงโพลาไรซ์กำลังขยาย 50 เท่า	97
43	ภาพเม็ดแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และแสงโพลาไรซ์กำลังขยาย 50 เท่า	98
44	ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	99
45	ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	100
46	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer	101
47	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer	102
48	การเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	104
49	การเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	105

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	การเกิดรีโทเกรเดชันของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	
51	การเกิดรีโทเกรเดชันของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	108
52	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	109
53	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	112
54	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	113
55	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	116
56	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	117
57	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	119

### คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

RVA คือ Rapid Visco Analyzer

SEM คือ Scanning Electron Microscope

DSC คือ Differential Scanning Calorimeter

STMP คือ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต

3 M NaOH คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์

%CWS คือ ร้อยละความสามารถในการละลายน้ำเย็น

HA คือ แป้งข้าวอะมิโลสสูง

MA คือ แป้งข้าวอะมิโลสปานกลาง

LA คือ แป้งข้าวอะมิโลสต่ำ

HA-GCWSS คือ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวอะมิโลสสูง

MA-GCWSS คือ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวอะมิโลสปานกลาง

LA-GCWSS คือ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวอะมิโลสปานกลาง

HA-CL-GCWSS คือ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงก์ของแป้งข้าวอะมิโลสสูง

LA-CL-GCWSS คือ แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงก์ของแป้งข้าวอะมิโลสต่ำ

## การพัฒนาแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งดิบ และแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวที่มีปริมาณ แอมิโลสแตกต่างกัน

### Development of Granular Cold Water Soluble Starches from Native and Crosslinked Rice Starches Having Different Amylose Contents

#### คำนำ

แป้ง (starch) เป็นส่วนประกอบหลักของข้าว ที่มีองค์ประกอบสำคัญ 2 ชนิด คือ แอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกติน (amylopectin) แป้งข้าว (rice starch) เป็นแป้งทางการค้าที่มีความหลากหลายทางพันธุกรรม ได้แก่ แป้งข้าวแอมิโลสต่ำมากหรือแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวแอมิโลสต่ำ แป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง และแป้งข้าวแอมิโลสสูง มีเม็ดแป้ง (starch granule) ขนาดเล็ก 3-8 ไมครอน รองจากเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ (2-5 ไมครอน) รูปร่างหลายเหลี่ยม และมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่มีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่แอมิโลเพกตินสายสั้นแบบหนาแน่นมาก

แป้งมีสมบัติทางหน้าที่หลากหลาย เช่น เป็นสารให้ความข้นหนืด เป็นสารเคลือบกลืนรส เป็นสารปรับเนื้อสัมผัส เป็นสารเพิ่มปริมาณ เป็นต้น โดยทั่วไป แป้งมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำเย็น เป็นผลให้ไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์บางชนิดที่ต้องการให้แป้งละลาย หรือเกิดเป็นแป้งเปียกได้ทันทีโดยไม่ต้องให้ความร้อน เช่น instant food แป้งดัดแปรที่มีสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น ได้แก่ แป้งพรีเจล (pregelatinized starch) และแป้งละลายน้ำเย็น (Granular Cold Water Soluble Starch; GCWS starch) ในทางการค้าสามารถเตรียมแป้งพรีเจลได้ด้วยวิธีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum drying) การทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) หรือการอัดรีด (extrusion) ขณะที่แป้งละลายน้ำเย็นได้จากการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง (alcoholic-alkaline treatment) โดยแป้งละลายน้ำเย็นที่ได้จะอยู่ในสภาวะเม็ดแป้ง และให้แป้งเปียกที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล ซึ่งเมื่อนำแป้งละลายน้ำเย็นมาเตรียมเป็นแป้งเปียก โดยไม่ใช้ความร้อน แป้งจะอยู่ในสภาวะเม็ดแป้งที่พอง (Chen and Jane, 1994a) ในกระบวนการผลิตแป้งละลายน้ำเย็นประสิทธิภาพ และคุณภาพของการผลิต จะขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบ เช่น แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพด แป้งกล้วย แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาคุ (Chen and Jane, 1994a,b; Bello-Pérez *et al.*, 2000; Singh and Singh, 2003; Kaur *et al.*, 2010) และสภาวะการผลิต ได้แก่

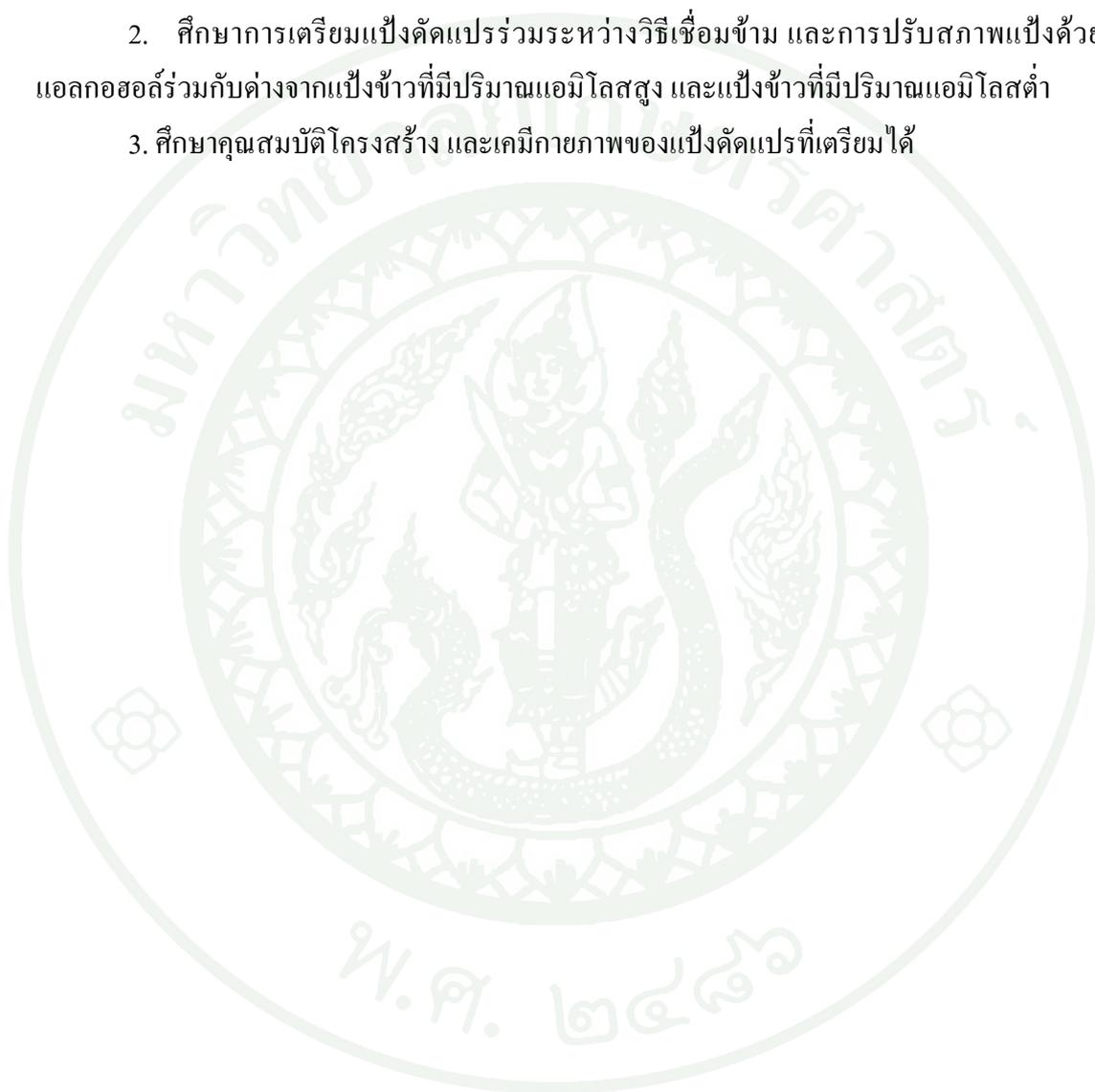
ความเข้มข้นและชนิดของแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Jane และ Seib, 1991) ที่ต้องสอดคล้องกับวัตถุดิบแต่ละชนิด ซึ่งมีความยากง่ายในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกัน อันเนื่องมาจาก สมบัติโครงสร้างที่เป็นผลมาจากองค์ประกอบของเม็ดแป้ง (ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพกติน และอื่น ๆ เช่น ไขมัน ฟอสเฟต) การจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน (ได้แก่ ความเป็นผลึก โครงสร้างผลึก) ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง เป็นต้น

นอกจากแป้งพรีเจลจะสามารถเตรียมได้จากแป้งดิบแล้ว ยังมีการเตรียมแป้งพรีเจลจากแป้งคัดแปรทางเคมี เพื่อเพิ่มสมบัติทางการละลายให้กับแป้งคัดแปรนั้น ๆ เช่น แป้ง stabilized-pregel แป้ง crosslinked-pregel เป็นต้น โดยแป้งครอสลิงค์จะนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการให้แป้งเปียกมีความคงตัว ไม่สูญเสียความหนืดในระหว่างกระบวนการผลิตหรือในผลิตภัณฑ์อาหาร แต่เนื่องจาก แป้งครอสลิงค์จะมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นในการเตรียมแป้งพรีเจลจะใช้สภาวะในการผลิตที่แตกต่างจากแป้งดิบ (Woo and Seib, 1997) จึงได้นำแป้งครอสลิงค์มาทำการคัดแปรเป็นแป้งละลายน้ำเย็น ด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง เพื่อให้เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และมีแรงเหนือนจากการกวนของเครื่องมือรวมทั้งชะลอการเกิดเจลาติไนเซชัน แต่สามารถละลายได้ทันทีในน้ำเย็น และยังคงลักษณะความเป็นเม็ดแป้งเมื่อให้ความร้อน

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ แป้งข้าวแอมิโลสสูง ปานกลาง และต่ำ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็นมากกว่าร้อยละ 70 รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ สมบัติทางโครงสร้าง และความหนืด จากแป้งข้าวละลายน้ำเย็นที่เตรียมได้ นอกจากนี้ ยังได้ทำการคัดแปรแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวแอมิโลสสูง และต่ำ เพื่อให้แป้งเปียกมีความแข็งแรงมากขึ้น ทนต่อแรงเหนือน มีความหนืดคงตัวขณะกวน ละลายได้ทันทีในน้ำเย็น และยังคงลักษณะความเป็นเม็ดแป้ง ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการสร้างเทคโนโลยีการผลิตแป้งคัดแปรจากแป้งข้าว

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น โดยการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์ร่วมกับแป้งจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน
2. ศึกษาการเตรียมแป้งตัดแปรร่วมระหว่างวิธีเชื่อมข้าม และการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์ร่วมกับแป้งจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง และแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ
3. ศึกษาคุณสมบัติโครงสร้าง และเคมีกายภาพของแป้งตัดแปรที่เตรียมได้



## การตรวจเอกสาร

### 1. ข้าว

ประเทศไทยเป็นประเทศที่สามารถผลิตข้าวมากเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ผลผลิตข้าวประมาณร้อยละ 60-70 ใช้เพื่อการบริโภคภายในประเทศทั้งในรูปแบบของการบริโภคโดยตรง ใช้เลี้ยงสัตว์ และเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมแป้ง อุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และบะหมี่ เป็นต้น

#### 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารหลักที่มีในข้าว คือ คาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ยังประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ และเถ้า ดังตารางที่ 1 โดยองค์ประกอบทางเคมีของข้าวจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ และสภาวะการปลูกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อปริมาณโปรตีนในข้าว ได้แก่ การใส่ปุ๋ยในโตรเจนในระยะต่าง ๆ ขณะที่ต้นข้าวกำลังเจริญเติบโต จะมีผลต่อการสร้างโปรตีนในเมล็ดข้าว อีกทั้ง ระยะเวลาในการปลูกที่สั้น สภาพอากาศที่มีเมฆปกคลุมมาก ในขณะที่ต้นข้าวกำลังสร้างเมล็ด เช่น ฤดูฝนจะมีผลให้มีโปรตีนในเมล็ดข้าวสูงขึ้น สภาพแวดล้อมที่ผิดปกติในบางช่วง เช่น ดินมีเกลือหรือเบสสูง อุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก จะมีผลทำให้เมล็ดข้าวมีโปรตีนสูงขึ้นได้ เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณแป้งหรือแป้งในเมล็ดข้าวลดลงด้วย (อรอนงค์, 2550)

กระบวนการแปรรูปข้าวมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าว (Juliano, 1972) เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือก และส่วนที่ได้จากการกระเทาะเปลือก ขัดขาว และขัดมัน พบว่า แต่ละส่วนมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

#### 1.2 แป้ง และฟลาวข้าว

ฟลาวข้าว (rice flour) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากการนำเอาข้าวหรือปลายข้าวที่ได้จากการขัดสีมาบดหรือโม่ ดังนั้นส่วนประกอบของฟลาวจึงประกอบด้วยสารอาหารต่าง ๆ หลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุต่าง ๆ เป็นต้น (Winton and Winton, 1906)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้น ร้อยละ 14

ส่วนของข้าว	โปรตีน (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	เส้นใย (กรัม)	เถ้า (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73
ข้าวกล้อง	7.1- 8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	73-87
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2-21.0	22-34

ที่มา: Juliano (1985)

แป้งข้าว (rice starch) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอาฟลาวข้าวมาผ่านกระบวนการที่ทำให้ได้แป้งบริสุทธิ์ โดยกำจัดองค์ประกอบทางเคมีอื่นที่อยู่ร่วมกับแป้งออกไปได้ แป้งบริสุทธิ์ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต

จากองค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่ผ่านการขัดสี พบว่า มีแป้งเป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุดถึงร้อยละ 90.2 และพบโปรตีนมากเป็นอันดับรองลงมา (ร้อยละ 7.3-8.3) ดังนั้น ในการผลิตแป้งข้าวจึงต้องกำจัดโปรตีนออกไป ซึ่งสามารถจำแนกโปรตีนในข้าวเป็นกลุ่มได้โดยอาศัยหลักการละลายของโปรตีนแต่ละชนิดในตัวทำละลายที่ต่างกัน (Matsuo *et al.*, 1997) ดังนี้

(1) อัลบูมิน (Albumin) โปรตีนชนิดนี้ละลายได้ในน้ำหรือน้ำที่มีค่าความเป็นกรดอยู่เพียงเล็กน้อย ตกตะกอนได้ทันทีเมื่อให้ความร้อน และเป็นองค์ประกอบสำคัญของเอนไซม์

(2) โกลบูลิน (Globulin) โปรตีนชนิดนี้ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.4 โมลาร์ และตกตะกอนได้ยากแม้จะให้ความร้อนก็ตาม

(3) กลูทีลิน (Glutelin) โปรตีนชนิดนี้จะไม่ละลายทั้งในน้ำ สารละลายเกลือ และสารละลายเอทานอล แต่ละลายได้ในน้ำซึ่งมีกรดหรือด่าง (สารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์) เป็นโปรตีนหลักที่พบอยู่เป็นจำนวนมากในข้าว

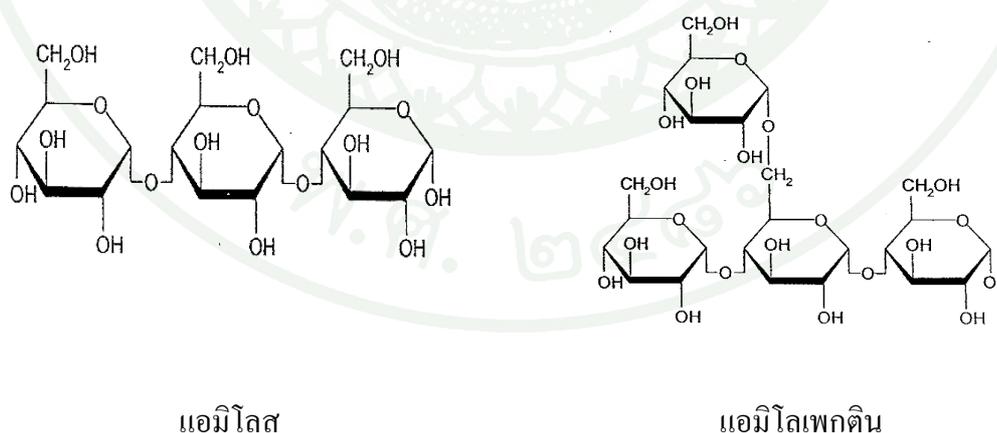
สามารถแยกออกได้โดยสารละลายต่าง ดังนั้น ในกระบวนการผลิตแป้งข้าวทั่วไป จึงใช้การล้างฟลาวข้าวด้วยสารละลายต่าง

(4) โปรลามิน (Prolamin) โปรตีนชนิดนี้ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 70–80

## 2. สมบัติทั่วไปของแป้ง

### 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้ง เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สังเคราะห์โดยพืชชั้นสูง และเก็บสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง) ราก (มันสำปะหลัง) หัว (มันฝรั่ง มันเทศ ท้ายายม่อม) และลำต้น (สาकु สับปะรด) เป็นต้น ประกอบด้วยโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส ที่อยู่ในรูปของ anhydroglucose unit (AGU) ที่มีสูตรเคมี  $C_6H_{10}O_5$  เชื่อมต่อเป็นสายยาวขนาดใหญ่ในรูปของเม็ดแป้ง (starch granule) โดยน้ำตาล AGU จะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในลักษณะเส้นตรง เรียกว่า แอมีโลส (amylose) และโมเลกุลเชิงกิ่ง เรียกว่า แอมีโลเพกติน (amylopectin) (ภาพที่ 1) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของแอมีโลสและแอมีโลเพกตินแตกต่างกัน (ตารางที่ 2) ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติและการใช้ประโยชน์ของแป้งแต่ละชนิด (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543)



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของแอมีโลส และแอมีโลเพกติน

ที่มา: กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล (2543)

ตารางที่ 2 รูปร่าง ขนาด และปริมาณแอมิโลสของเมล็ดแป้งจากพืชชนิดต่าง ๆ

ชนิดของพืช	รูปร่าง	ขนาด (ไมครอน)	ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)
ข้าวโอ๊ต	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม	5-15	27
ข้าวสาลี	กลมค่อนข้างรี	2-38	26-31
ข้าวโพด	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม	5-25	28
ข้าวโพดข้าวเหนียว	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม	-	0-1
ข้าวเดือย	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม	4-12	-
ข้าวบาร์เลย์	กลมคล้ายไข่	2-5	22-29
ข้าว	แบนมีหลายเหลี่ยม	3-8	14-32
ข้าวไรน์	กลมค่อนข้างรี	12-40	28
ข้าวฟ่าง	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม	4-24	21-34
มันสำปะหลัง	กลมคล้ายไข่ที่มีรอยตัด	5-35	17
มันฝรั่ง	กลมรูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย	15-100	23

ที่มา: Blanshard (1987)

อัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่ต่างกันของข้าว จะส่งผลต่อเนื้อสัมผัสทำให้จุดประสงค์ในการนำมาใช้ประโยชน์ต่างกัน โดยได้มีการจำแนกข้าวที่ผ่านการขัดสีตามปริมาณของแอมิโลสด้วยวิธีการเกิดลึกับสารละลายไอโอดีน ดังนี้ (Juliano, 1984)

(1) ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำมากหรือข้าวเหนียว (waxy) มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนักแห้ง ใช้ทำขนมหวานและน้ำเคล้าสลัด เป็นอาหารหลักของประเทศลาว และทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งเตรียมโดยการนำข้าวมาแช่น้ำและนึ่ง

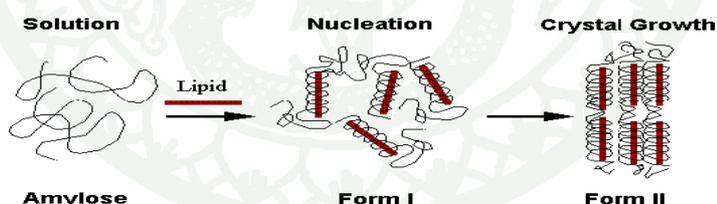
(2) ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (low amylose rice) มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 9-20 โดยน้ำหนักแห้ง ใช้ในอาหารเด็ก อาหารเช้า และขนมปังที่ใช้เชื้อยีสต์เพื่อทำให้ขึ้นฟู

(3) ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง (medium amylose rice) มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนักแห้ง ในประเทศฟิลิปปินส์จะนำข้าวชนิดนี้ไปใช้ในการทำเค้กที่จะต้องมีการหมัก และชุบกระป๋อง

(4) ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (high amylose rice) มีปริมาณแอมิโลสมากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นข้าวที่นิยมใช้ในการทำก๋วยเตี๋ยว

แอมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage น้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสจะอยู่ในช่วง  $10^5$ - $10^6$  ดาลตัน แอมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของแอมิโลสยาวขึ้น จะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติแอมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก แอมิโลสเป็นโมเลกุลที่มีความยืดหยุ่นและสามารถเคลื่อนที่ได้ (Freach, 1979) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้สามารถจับกับโมเลกุลแป้งอื่น ๆ ได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ โมเลกุลของแอมิโลสยังสามารถจับกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียร ในการทำลายพันธะนี้ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส (Kugimiya *et al.*, 1980)

แอมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน ฟีนอล สารลดแรงตึงผิว และสารไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยแอมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ ดังภาพที่ 2



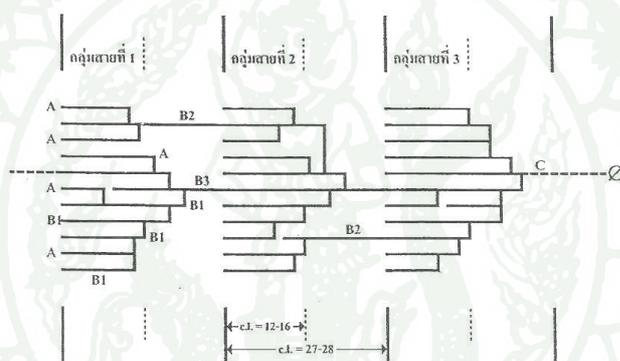
ภาพที่ 2 โครงสร้างขององค์ประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน

ที่มา: บุญทิวา (2548)

แอมิโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสสายตรงขนาดสั้น ที่มีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 10-60 หน่วย (Degree of polymerization; DP) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glucosidic linkage และส่วนของกิ่งสาขาที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glucosidic linkage ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 5 ของปริมาณพันธะไกลโคสิติกทั้งหมด (Gallant *et al.*, 1992)

Hizukuri (1986) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกติน ดังภาพที่ 3 โดยโครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ

- (1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้
- (2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างแอมิโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8 – 0.9 : 1
- (3) สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในโมเลกุลของแอมิโลเพกตินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

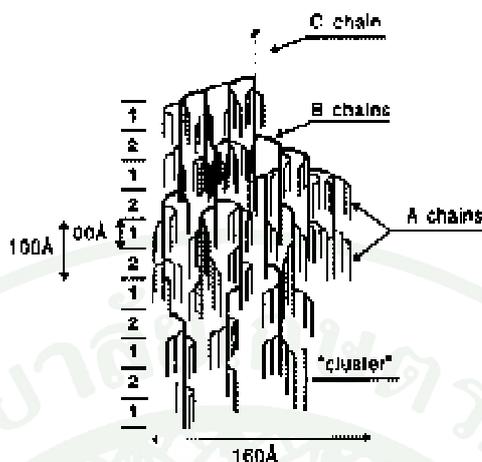


ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างแอมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C

ที่มา: Hizukuri (1986)

ลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดียว สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผลออกไปทำให้เกิดเป็นกลุ่มสาย 2 และ 3 กลุ่ม ตามลำดับ โดยสาย A B1 และ B2 จะมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 6-12, 13-24 และ 25-45 ตามลำดับ ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกตินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงขนาดใหญ่เหล่านี้จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster)

Robin *et al.* (1974) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของแอมิโลเพกตินจากมันฝรั่ง โดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) และเบต้าอะไมเลส ( $\beta$ -amylase) แสดงโครงสร้างของแอมิโลเพกติน ดังภาพที่ 4 ส่วนที่หนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (crystallite region) ส่วนที่สองที่เป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อมแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (amorphous region)



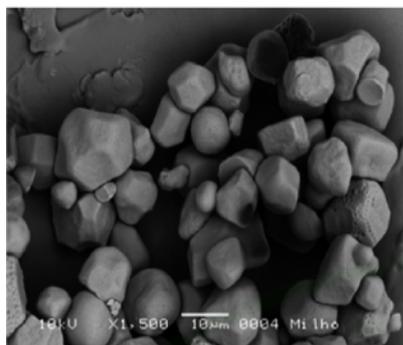
ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างแอมิไลด์เพคตินที่ประกอบด้วย 1 คือ ส่วนผลึก และ 2 คือ ส่วนอสัณฐาน

ที่มา: Robin *et al.* (1974)

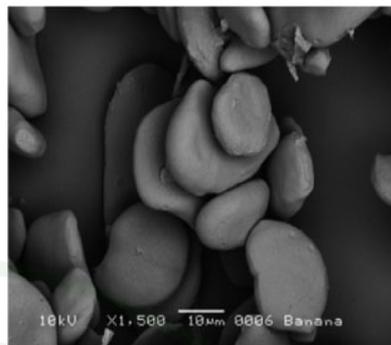
## 2.2 สมบัติทางโครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

เมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ดังภาพที่ 5 พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ

โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพคตินที่เป็นองค์ประกอบของแป้งจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่เป็นกึ่งระเบียบเกิดขึ้น โดยในโมเลกุลของแอมิโลเพคตินนั้นส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงจะเกิดโครงสร้างที่เป็นเกลียวคู่ (double helices) ที่มีความเป็นระเบียบ ในขณะที่ส่วนที่เป็นพันธะกึ่งจะมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบที่เรียกว่า ออสัณฐาน โมเลกุลของแอมิโลสจะพบทั้งในลักษณะที่เป็นม้วนอิสระหรือเป็นเกลียว ดังนั้น โครงสร้างของเม็ดแป้งจึงมีลักษณะที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นระเบียบ และไม่เป็นระเบียบ ลักษณะเช่นนี้ จะทำให้เมื่อตรวจสอบเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรส์จะเกิดลักษณะกากบาท (maltese cross) ที่เรียกว่า birefringence ภายใต้อสงโพลาไรส์ พื้นที่มืดที่ปรากฏเป็น 2 แขนตัดกันจะเป็นตำแหน่งของสายแอมิโลสและแอมิโลเพคตินที่อยู่ในลักษณะตั้งฉากและขนานกับระนาบแสงโพลาไรส์ ส่วนพื้นที่ที่แสงสว่างส่องผ่านเป็นตำแหน่งของสายที่ไม่ได้ตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสง ทำให้สามารถบิเคราะห์แสงได้ ดังภาพที่ 6



แป้งข้าวโพด



แป้งกล้วย

ภาพที่ 5 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ที่มา: Dayane *et al.* (2007)



ภายใต้แสงธรรมดา

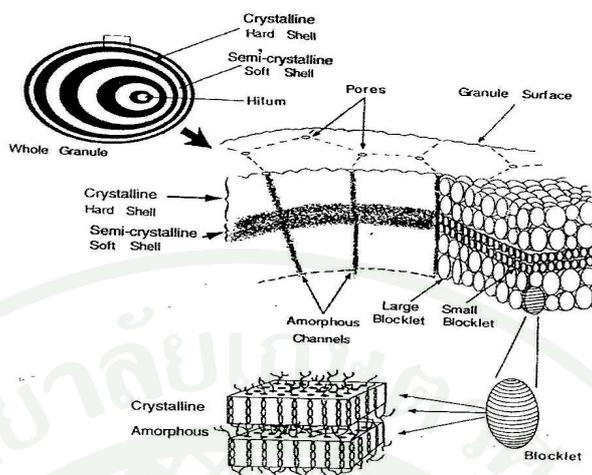


ภายใต้แสงโพลาไรส์

ภาพที่ 6 ลักษณะเม็ดแป้งข้าวโพดจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

ที่มา: [www.cybercolloids.net/photos/search.php](http://www.cybercolloids.net/photos/search.php)

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยชั้นแข็ง (hard shell) และชั้นอ่อน (soft shell) เรียงตัวสลับกันอย่างเป็นระเบียบ โดยแต่ละชั้นมีความหนาอยู่ในระหว่าง 120-400 นาโนเมตร ชั้นต่าง ๆ ดังกล่าวเกิดจากการเรียงตัวกันของโครงสร้างย่อยที่เรียกว่า blocklet โดยขนาดของ blocklet ในชั้นแข็งจะใหญ่กว่าในชั้นอ่อน เมื่อพิจารณาถี่กลงไปภายในแต่ละ blocklet จะพบโครงสร้างหลัก คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก เรียงตัวเป็นชั้นสลับกับส่วนอสัณฐาน (Gallant *et al.*, 1997) ดังภาพที่ 7



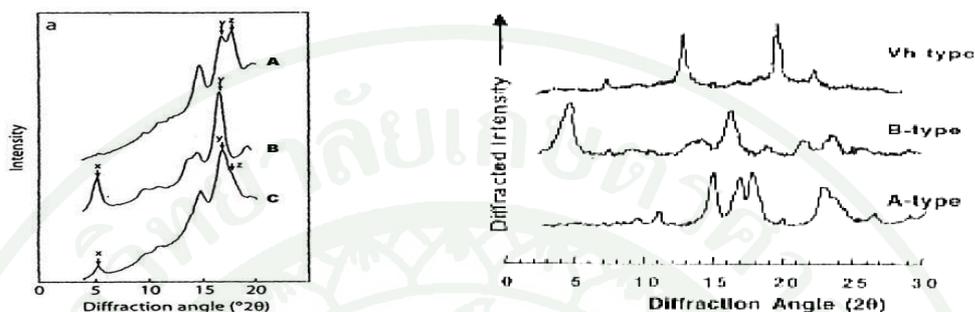
ภาพที่ 7 โครงสร้างภายในเม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างผลึก และส่วนอสัณฐาน ที่ประกอบกันขึ้นเป็นชั้นแข็ง และชั้นอ่อน

ที่มา: คัดแปลงจาก Gallant *et al.* (1997)

ภายในแต่ละ blocklet ประกอบด้วยชั้นผลึกที่เกิดจากส่วนเกลียวคู่ที่เป็นแขนงข้าง (side chain) ของสายเอมิโลเพกติน เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบสลับกับชั้นอสัณฐานที่เกิดจากบริเวณที่เป็นกิ่ง (branching region) ของสายเอมิโลเพกติน (Robbin *et al.*, 1974) จะเห็นได้ว่า สายเอมิโลเพกตินจะเป็นส่วนประกอบทั้งในส่วนโครงสร้างผลึกและส่วนอสัณฐาน ทั้งนี้จำนวนเอมิโลเพกตินร้อยละ 80-90 ของทั้งหมดจะอยู่ในส่วนของชั้นผลึก และอีกร้อยละ 10-20 จะอยู่ในส่วนอสัณฐาน (Manners, 1989) ส่วนที่เป็นชั้นผลึกจะเป็นส่วนที่ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงคงรูปร่างของเม็ดแป้งไว้ ส่วนอสัณฐานจะเป็นส่วนที่ยึดเกาะชั้นผลึกไว้ด้วยกัน และเป็นส่วนที่สร้างความยืดหยุ่นให้กับเม็ดแป้ง (Morrison *et al.*, 1994)

ส่วนโครงสร้างผลึกของสายเอมิโลเพกตินเป็นส่วนหลักในการแสดงค่าความเป็นผลึกให้แก่เม็ดแป้ง ค่าความเป็นผลึกของเม็ดแป้งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง เม็ดแป้งขนาดต่างกันอย่างมีปริมาณ โครงสร้างผลึกแตกต่างกันได้ เช่น ในแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าจะมีบริเวณโครงสร้างผลึกภายในต่ำกว่าเม็ดแป้งขนาดใหญ่ เป็นต้น (Franco *et al.*, 1992; Franco *et al.*, 1998) ค่าความเป็นผลึกของเม็ดแป้งโดยปกติจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 15-45 สามารถทดสอบได้โดยใช้หลักการของ X-ray diffraction ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวที่ต่างกันของเกลียวคู่ที่เป็นแขนงข้างของสายเอมิโลเพกตินนั่นเอง (Zobel, 1988)

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันจะให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงแตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งโดยเทคนิค wide angle x-ray diffraction (WAXS) ดังภาพที่ 8 โดยสามารถแบ่งลักษณะผลึกของเม็ดแป้งได้ 4 แบบ (Shelton and Lee, 2000) ดังนี้



ภาพที่ 8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A, B, C และ V

ที่มา: Bogracheva *et al.*, (1998); Buléon *et al.*, (1998)

- (1) แบบ A พบในแป้งจากธัญพืชที่มีปริมาณแอมิโลสไม่เกินร้อยละ 40 เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าว
- (2) แบบ B พบในแป้งจากพืชหัวและส่วนราก หรือจากพืชชนิดที่มีแอมิโลสสูง รวมทั้งแป้งที่เกิดรีโทรเกรดแล้ว เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพดแอมิโลสสูง (high amylose maize starch)
- (3) แบบ C เป็นลักษณะที่รวมกันของแบบ A และ B พบได้ในแป้งจากพืชตระกูลถั่ว
- (4) แบบ V พบได้ในแป้งที่มีแอมิโลสสูงบางชนิด แต่โดยทั่วไปเป็นแป้งที่เกิดเจลาติไนซ์แล้วและจับกับไขมันไว้

โครงสร้างผลึกแบบ V จึงแสดงถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแป้ง โดยสายของกลูโคสจะเกิดเป็นเกลียวกับส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) บริเวณผิวด้านนอก และส่วนช่องตรงกลางที่มีลักษณะไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) สามารถจับกับโมเลกุลพวกไม่มีขั้ว เช่น ไขมัน จึงมีรูปแบบของโครงสร้างเหมือนกับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอโอดีนกับแป้ง (Thomas and Atwell, 1999) สำหรับความแตกต่างระหว่างแบบ A และแบบ B อยู่ที่การจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ และปริมาณน้ำในโครงสร้างแป้งแต่ละชนิด (Billaderis, 1998) สำหรับแป้งข้าวจึงมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นแบบ A ทั้งในแป้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้า ซึ่งปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 5.8, 3.8 องศาอังสตรอม และมีลักษณะ 2 พีคที่ทับกันอยู่ตรงตำแหน่ง 5.2 และ 4.9 องศาอังสตรอม โดยความเป็น

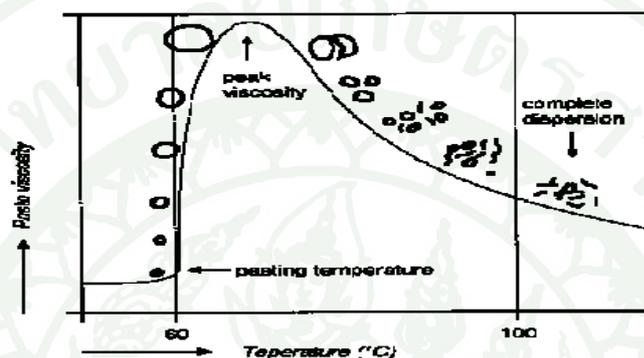
ผลึกโดยเปรียบเทียบ (relative crystallinity) ของแป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ 48) สูงกว่าในแป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ 37-40) (Iturriaga *et al.*, 2004)

### 2.3 สมบัติทางเคมีกายภาพและหน้าที่ของแป้ง

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จากสายแอมิโลสและแอมิโลเพกตินจำนวนมาก ยึดเกาะกันเองด้วยพันธะไฮโดรเจน (มีคุณสมบัติชอบน้ำ) หรืออาศัยน้ำเป็นตัวกลางเชื่อมต่อ แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้ จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach *et al.*, 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัว โมเลกุลน้ำจะแทรกตัวเข้าทำลายพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในเม็ดแป้งโดยเริ่มจากส่วนออสติฐาน ทำให้เม็ดแป้งดูดน้ำและพองตัว เมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกการพองตัวเกิดมากขึ้นจนทำลายส่วนของโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้น และมีความโปร่งแสง (optical transmittancy) เพิ่มขึ้น (Svensson and Eliasson, 1995) เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาตินไนซ์ เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่าอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ (ภาพที่ 9) คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ (reversible swelling) เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดคดหย่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และมีความสามารถในการบิระนาบแสงโพลาไรส์ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารละลายแป้งจนถึงอุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เพื่อเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible swelling) เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและสูญเสียโครงสร้างที่เป็นระเบียบ จะไม่ปรากฏลักษณะ birefringence ความหนืดของสารละลายแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลาย

ได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าหวิ้งแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เม็ดแป้งจะเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ และพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ดีขึ้น



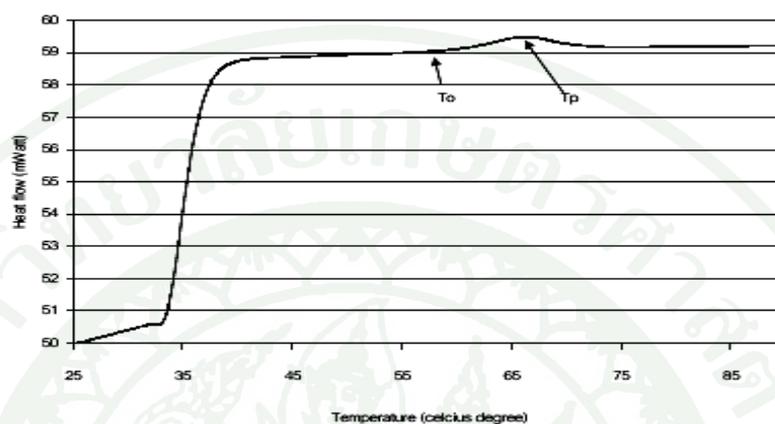
ภาพที่ 9 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา: Sanders (1996)

ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน และปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง สามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และให้ผลเป็นค่าพลังงานเรียกว่า ค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) (Zobel, 1984) (ภาพที่ 10) อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน สามารถแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและความแข็งแรงภายในโมเลกุลของเม็ดแป้งได้ แป้งที่มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลมาก จะมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาติไนซ์ ( $T_0$ ) สูง และมีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันมาก เนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากในการทำให้เม็ดแป้งทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ

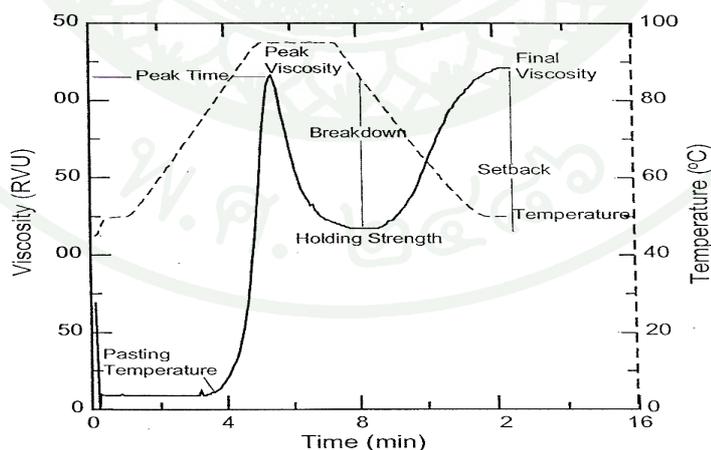
ในขณะที่เม็ดแป้งได้รับความร้อนและเกิดเจลาติไนเซชัน จะทำให้น้ำแป้งมีความหนืดเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้ง สามารถตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด เช่น การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield Viscometer) เครื่องบราเบนเดอร์แอมิโลกราฟ (Brabender Amylograph) และเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) เป็นต้น โดยเครื่องบราเบนเดอร์แอมิโลกราฟ และเครื่อง RVA นี้สามารถติดตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงความ

หนืด (pasting curve) ของน้ำแป้งขณะทำให้ร้อนและเย็นได้ (ภาพที่ 11) โดยที่แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบและสมบัติทางโครงสร้างที่ต่างกัน (ตารางที่ 3)



ภาพที่ 10 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์การเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เมื่อใช้สารผสมแป้งกับน้ำ 30:70 (To = Onset temperature, Tp = Peak temperature)

ที่มา: Swinkels (1985)



ภาพที่ 11 ลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd. (1995)

ตารางที่ 3 สมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

แป้ง	อุณหภูมิที่เริ่ม เปลี่ยนความหนืด (องศาเซลเซียส)	ความแตกต่าง			ลักษณะเนื้อสัมผัส ของแป้งเปียก	ความใสของแป้งเปียก
		ความหนืดสูงสุด	ของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด	การคืนตัวของแป้ง		
ข้าวสาลี	52-65	ต่ำ	ต่ำ/ปานกลาง	ปานกลาง/สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด	62-72	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพดข้าวเหนียว	63-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
ข้าวฟ่าง	68-78	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวเจ้า	61-78	ปานกลาง	ต่ำ/สูง	ปานกลาง/สูง	สั้น	ทึบแสง
มันสำปะหลัง	50-68	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
มันฝรั่ง	56-69	สูง	สูง	ปานกลาง	ยาว	โปร่งแสง
สาเก	60-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง

ที่มา: Newport Scientific Pty, Ltd. (1995)

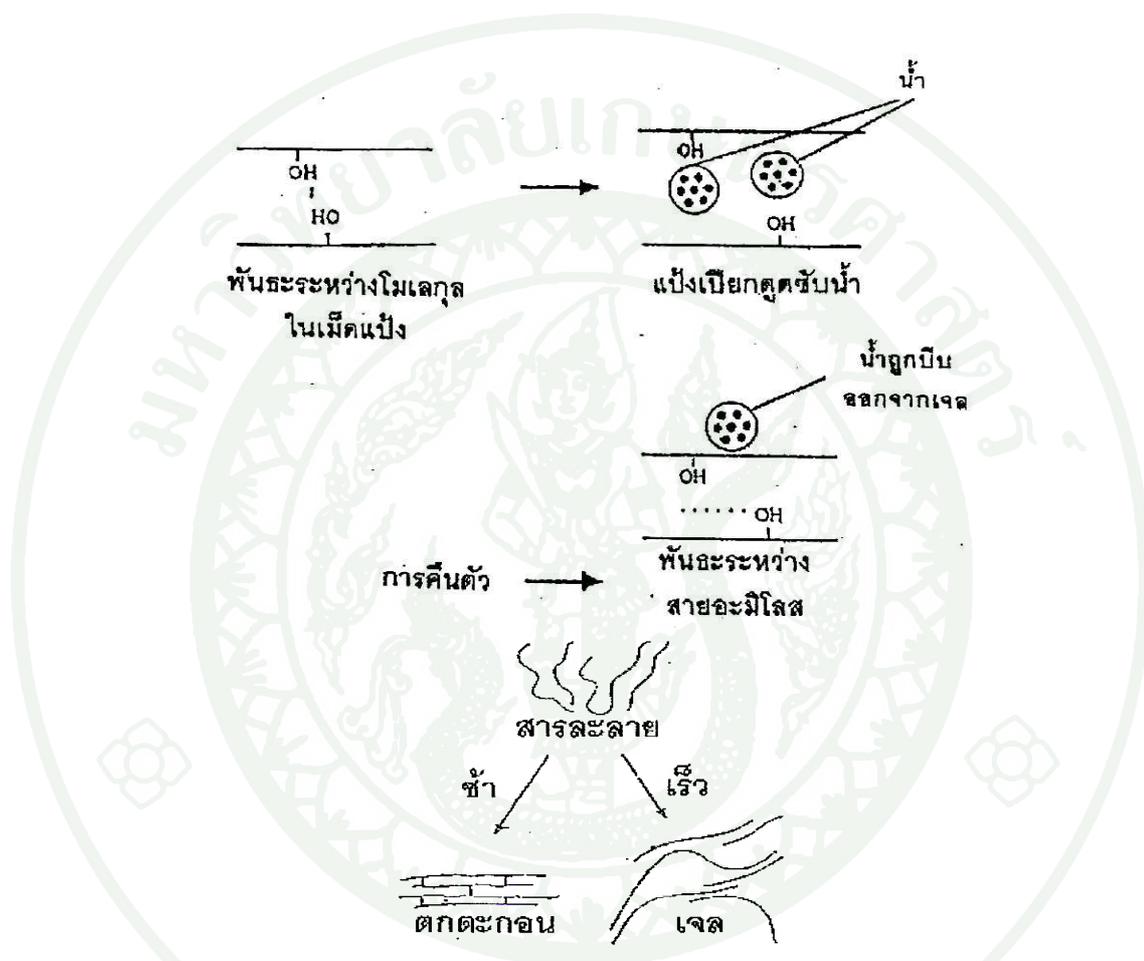
ในการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA สามารถอ่านค่าต่าง ๆ ได้ ดังนี้

- (1) peak time คือ เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
- (2) pasting temperature คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- (3) peak temperature คือ อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- (4) peak viscosity คือ ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (5) holding strength คือ ความหนืดที่จุดต่ำสุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU
- (6) breakdown คือ ผลต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (7) final viscosity คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
- (8) setback from peak คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- (9) setback from trough คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำ และไม่มีการควบแน่นเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว (setback) (Smith, 1979) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 12

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของแอมิโลส แอมิโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง เป็นต้น ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น แสดงกลไกในการคืนตัวของแป้งดังภาพที่ 12 ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ

และความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง แอมโมเนียสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แอมโมเนียสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แอมโมเนียจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแอมโมเนียจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก (monovalent anion และ cation) แคลเซียมไนเตรต (calcium nitrate) และยูเรีย (urea) เป็นต้น (Swinkels, 1985)



ภาพที่ 12 การเกิดรีโทรเกรดเซน และกลไกการคืนตัวของแอมโมเนีย

ที่มา: กล้านรงค์ และ เกื้อกุล (2543)

### 3. การตัดแปรแอมโมเนีย

แอมโมเนียโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ ในช่วงความหนืดแคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการ

ผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการคัดแปรคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี (Light, 1990) การคืนตัว และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลาย (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่น ๆ เพิ่มขึ้น (BeMiller, 1997) แป้งคัดแปรสามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

(ก) แป้งคัดแปรทางเคมี (chemical modification) ได้แก่

(1) การเกิดอนุพันธ์ (derivatization) ได้แก่ การแทนที่สารใน โมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ได้แก่ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งแอซีเตต (starch acetate) ปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch) หรือการแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิงค์ (cross-linked starch)

(2) การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch

(3) เดกซ์ทรีไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization/transglycosylation) โดยใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น ไพโรเดกซ์ทรีน (pyrodextrin)

(4) ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization) เช่น แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch)

(5) การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทรีน (maltodextrin)

(ข) การคัดแปรทางกายภาพ (physical modification) ได้แก่

(1) เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำแห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch)

(2) แป้งละลายน้ำเย็น (Granular Cold Water Soluble Starch : GCWS starch) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการให้ความร้อน

(3) การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล การทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกล จะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

(4) annealing เป็นการให้ความร้อนแก่น้ำแป้ง ขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชัน

(5) การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันแก่แป้งในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

(ค) การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification) ได้แก่

(1) แป้ง waxy คือ แป้งที่มีแอมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย พบในธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ซึ่งเกิดการกลายพันธุ์ เป็นสายพันธุ์ที่มียีนเฉพาะ คือ waxy gene มีผลต่อชนิดของแป้งที่สังเคราะห์ในเนื้อเยื่อเอนโดสเปิร์ม ดังนั้น เมื่อข้มลิแป้ง waxy ด้วยไอโอดีนจะได้สีแดงของแอมิโลเพกติน ต่างจากแป้งโดยทั่วไปที่ให้สีน้ำเงิน

(2) แป้ง high amylose คือ แป้งที่มีแอมิโลสสูง พบในพืชบางชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ถั่ว นักวิจัยศึกษาลักษณะทางพันธุกรรมที่มีต่ออัตราส่วนแอมิโลสและแอมิโลเพกตินในข้าวโพดเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นพืชที่เพาะปลูกได้ง่าย มีเมล็ดเป็นจำนวนมาก สามารถตัดแปลงสายพันธุ์และวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรมได้ง่าย (Zuber, 1965)

### 3.1 แป้งพรีเจลาติไนซ์ และแป้งละลายน้ำเย็น

#### 3.1.1 แป้งพรีเจลาติไนซ์ หรือแป้งพรีเจล

มีชื่อทางการค้าว่า แป้งอัลฟา (alpha starch) เป็นแป้งตัดแปรทางกายภาพที่เตรียมได้โดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบ (native starch) หรือแป้งตัดแปรทางเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนซ์ แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum dryer) เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) หรือเครื่องอัดรีด (extruder) แล้วจึงนำไปบดให้ละเอียด ซึ่งเครื่องทำแห้งแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไป โดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะเป็นวิธีที่เหมาะสมและนิยมมากที่สุด (Powell, 1967) เนื่องจากสามารถมีอัตราการผลิตได้สูง ส่วนการใช้เครื่องอัดรีด มีอัตราการผลิตต่ำแต่มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความสะอาด และการควบคุมคุณภาพ

แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งดัดแปรที่สามารถละลายและกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจลหรือมีแนวโน้มในการเกิดเจลลดลง และสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ (Powell, 1967) นอกจากนี้ สมบัติความคงตัวของแป้งเปียกจะลดลง มีความแข็งแรงของเจลลดลง (Rajagopalan and Seib, 1992) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการการละลายและให้ความหนืดได้ทันที โดยไม่ต้องใช้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ ซอส ใส่กึ่งสำเร็จรูป ส่วนผสมของซูปผง (Powell, 1967) ใช้เป็นสารยึดเกาะในอาหารประเภทเนื้อเพื่อช่วยรักษาความชุ่มชื้น และอุ้มน้ำในผลิตภัณฑ์ ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมเค้กเพื่อช่วยการดูดซับน้ำและเก็บฟองอากาศได้ดีขึ้น ทำให้เค้กมีความชุ่มชื้นและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ได้ลักษณะเนื้อเค้กที่มีความสม่ำเสมอ (Boettger, 1963) ใช้เป็นส่วนผสมในของหวานที่มีลักษณะคล้ายโยเกิร์ต (Gardiner, 1975) ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวสำหรับส่วนผสมของอาหารแช่แข็ง (Senda, 1991) ใช้ในเภสัชกรรม เป็นสารยึดเกาะและสารช่วยแตกตัวในการผลิตยาเม็ด ซึ่งจะช่วยให้เม็ดยาไม่เสียคุณสมบัติในการไหลและการยึดเกาะเป็นเม็ด นอกจากนี้ การที่สามารถใช้แป้งพรีเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นการช่วยประหยัดพลังงานการให้ความร้อนสำหรับการเตรียมแป้งเปียก (Mitrevej, 1996)

### 3.1.2 แป้งละลายน้ำเย็น

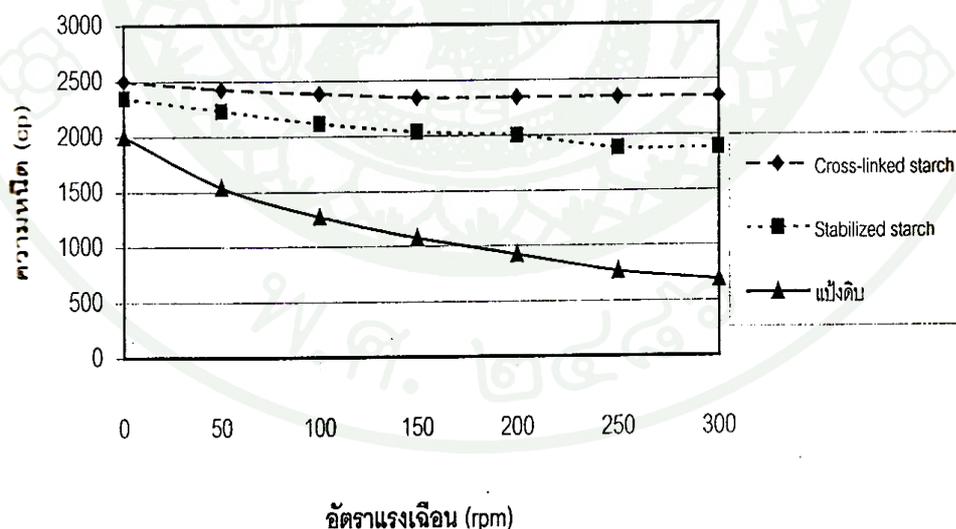
เป็นแป้งพรีเจลชนิดหนึ่งที่ได้จากการปรับสภาพแป้งด้วยแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง มีลักษณะเนื้อสัมผัสเรียบ มีความยืดหยุ่น ความมันเงา และความแข็งแรงสูงกว่าแป้งพรีเจล เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งพรีเจลจะทำให้เม็ดแป้งเสียรูป และมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่อนำไปอบแห้ง แต่แป้งละลายน้ำเย็นจะยังคงสภาพของเม็ดแป้งอยู่ ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูปหลายประเภท (Chen and Jane, 1994a) และเมื่อตรวจสอบเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะไม่เกิดลักษณะ birefringence (Eastman and Moore, 1984) นอกจากนี้ ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งละลายน้ำเย็นที่เตรียมได้จะมีโครงผลึกแบบ V (Jane *et al.*, 1986; Rajagopalan and Seib, 1992)

ในอดีตที่ผ่านมา นักวิจัยได้มีความพยายามที่จะผลิตแป้งที่สามารถพองตัวได้ในน้ำเย็น โดย Eastman and Moore (1984) ได้นำแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันมาผสมกับแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เอทานอล เมทานอล และไอโซโพรพานอล ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง แป้งที่เตรียมได้ให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Cold Water Solubility; %CWS) ร้อยละ 50 แต่ไม่สามารถเตรียมได้จากแป้งข้าวโพดชนิด waxy เนื่องจากเกิดเจลาติไนซ์ใน

ระหว่างการผลิต ต่อมา Eastman (1987) สามารถผลิตแป้งข้าวโพดละลายน้ำเย็นจากการผสมระหว่างแป้งข้าวโพดชนิด waxy กับแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสอย่างน้อยร้อยละ 20 ในอัตราส่วน 15 ต่อ 85 ได้สำเร็จ โดยนำแป้งมาผสมกับเอทานอล ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งมีค่า %CWS เท่ากับ 92 ต่อมา Rajagopalan and Seib (1992) ได้ผลิตแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี แป้งถั่วเขียว และแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวโพด ซึ่งมีค่า %CWS เท่ากับ 70-95 โดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่แขวนลอยในน้ำกับ polyhydric alcohol ที่อุณหภูมิสูงและความดันบรรยากาศ แต่ไม่สามารถเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดชนิด waxy หรือแป้งข้าวโพดแอมิโลสสูงได้ ขณะเดียวกัน Jane and Seib (1991) ได้ทำการปรับสภาพแป้งด้วยเอทานอลและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น เพื่อให้เม็ดแป้งพองตัว แล้วหยุดปฏิกิริยาด้วยกรดไฮโดรคลอริก ล้าง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แป้งที่เตรียมได้ให้ค่า %CWS เท่ากับ 50-94 วิธีนี้สามารถเตรียมได้กับแป้งทุกชนิด โดยแป้งข้าวโพดชนิด waxy ต้องเตรียมด้วย เอทานอลบริสุทธิ์ Chen and Jane (1994a,b) ได้ทำการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันโดยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง (alcoholic-alkaline treatment) พบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตด้วยวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับพันธุ์ของพืชที่นำมาสกัดแป้ง ความเข้มข้นของเอทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สภาวะในการผลิตที่แตกต่างกัน จะทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกัน โดยผลิตภัณฑ์มีค่า %CWS เท่ากับ 70-90 เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง นอกจากนี้ ในระหว่างการผลิตแป้งละลายน้ำเย็นแอมิโลสจะถูกชะออก ซึ่งจะเกิดการสูญเสียมากในแป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ขณะเดียวกันลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งจะเปลี่ยนจากแบบ A เป็นแบบ V พร้อมกันนี้เมื่อตรวจสอบเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์จะไม่เกิดลักษณะ birefringence ภายใต้แสงโพลาไรส์ เมื่อนำมาวิเคราะห์การเกิดเจลาติโนเซชันของแป้งด้วยเครื่อง DSC ไม่พบค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชันเมื่อเทียบกับแป้งดิบ และเมื่อวิเคราะห์ความหนืดด้วย Brabender Viscometer แป้งละลายน้ำเย็นจะให้ความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ ยกเว้น ในแป้งข้าวโพดแอมิโลสปานกลาง ต่อมา ได้มีนักวิจัยได้ทำการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการดังกล่าว จากแป้งกล้วย แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาธุ (Bello-Pérez *et al.* (2000); Singh and Singh (2003); Kaur *et al.* 2010)

### 3.2 แป้งครอสลิงค์

แป้งครอสลิงค์ หรือ crossbonded starch หรือ inhibit starch เป็นแป้งตัดแปรที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (multifunctional reagent) เรียกสารเคมีเหล่านั้นว่า cross-linking reagent หรือ inhibiting reagent ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หรืออีเทอร์ฟิเคชัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้มากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้าม (crosslink หรือ bridge) ระหว่างโมเลกุลของแป้งในสภาพแขวนลอย พันธะโควาเลนต์จะช่วยให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งไว้มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง โดยเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน (ภาพที่ 13) เพิ่มความหนืดของแป้งเปียกที่ร้อน ทำให้แป้งเปียกมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง เพิ่มความเหนียวให้แก่เม็ดแป้งที่พองตัว ทำให้เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นหนึ่งเดียวกัน ไม่แตกออก มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นที่มีความหนืดสูง ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งให้เหมาะแก่การหุงต้ม เมื่อเพิ่มระดับการทำครอสลิงค์จะเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง (Rutenberg and Solarek, 1984; Wurzburg, 1986)



ภาพที่ 13 ผลกระทบของแรงเฉือนต่อความหนืดของแป้งตัดแปรเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

ที่มา: กัล้านรงค์ และ เกื้อกุล (2543)

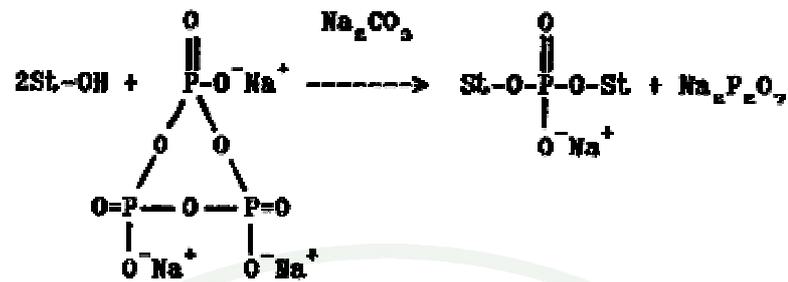
โดยทั่วไปการทำแป้งครอสติงจะช่วยเสริมพันธะไฮโดรเจนในเม็ดแป้งด้วยพันธะเคมี ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมระหว่างโมเลกุล ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนแก่แป้งครอสติงในน้ำ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย แต่เม็ดแป้งยังคงอยู่ในสภาพปกติ การทำแป้งครอสติงเป็นการควบคุมคุณสมบัติในระดับเม็ดแป้ง ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นจะน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง และปริมาณหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่มีภายในเม็ดแป้ง โดยส่วนใหญ่แป้งครอสติงจะมี 1 พันธะ ต่อกลูโคส 100-300 หน่วย

ในสหรัฐอเมริกา สารเคมีที่กฎหมายอนุญาตนำมาใช้ในการผลิตแป้งครอสติงทางการค้าเพื่อใช้ในอาหาร ได้แก่ โมโนโซเดียมฟอสเฟต (monosodium phosphate; SOP) โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (sodium trimetaphosphate; STMP) อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) ฟอสโฟริลคลอไรด์ (phosphoryl chloride; POCl<sub>3</sub>) สารผสมระหว่าง adipic กับ acetic anhydride และสารผสมระหว่าง succinic anhydride กับ vinyl acetate สำหรับ SOP และ STMP สามารถใช้แบบเดี่ยว ๆ หรือร่วมกับสารเคมีตัวอื่น ๆ ก็ได้ (Woo and Seib, 1997) โดยปกติการตัดแป้งโดยวิธีนี้จะใช้สารเคมีในปริมาณน้อยมาก โดยใช้ในช่วงร้อยละ 0.05-0.3 ของน้ำหนักแป้ง (Wurzberg, 1986) ปฏิกริยาจะเกิดที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Heckman, 1977)

ในอุตสาหกรรมอาหารมีเกณฑ์กำหนดและลักษณะสีของแป้งตัดแป้งประเภทไดสตาร์ชฟอสเฟต คือ ปริมาณฟอสเฟต (คำนวณเป็นฟอสฟอรัส) ไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับแป้งตัดแป้งที่มาจากแป้งมันฝรั่ง หรือแป้งจากข้าวสาลี และสำหรับแป้งจากพืชชนิดอื่น ๆ ไม่เกินร้อยละ 0.04 โดยเจลของแป้งตัดแป้งที่ได้จะต้องมีความคงตัว และเกิดเป็นเจลที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งดิบโดยทั่วไป (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

STMP เป็นสารประกอบพวก cyclic polyphosphate เป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ดี มีความเป็นพิษต่ำ และไม่มีการรายงานว่ามีผลร้ายต่อมนุษย์ สภาวะที่ STMP สามารถเกิดปฏิกริยากับแป้งได้ดี คือ ที่อุณหภูมิสูงสำหรับการตัดแป้งในสภาวะแป้งที่ค่อนข้างแห้ง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าสำหรับการตัดแป้งในสภาวะที่เป็นน้ำแป้ง (Kerr and Cleveland, 1957)

ปฏิกริยาของการตัดแป้งแบบครอสติงด้วย STMP เป็นลักษณะการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Rutenberg, 1980) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 สมการการเกิดปฏิกิริยาการตัดแปรแปงแบบครอสลิงค์โดยใช้ STMP

ที่มา: Rutenberg (1980)

### 3.2.1 การผลิตแปงครอสลิงค์

สภาวะที่ใช้ผลิตแปงครอสลิงค์จะแตกต่างกันไปตามสารเคมีที่ใช้ โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาคติในซ์ คือ ช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 50 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะเป็นกลางค่อนข้างเบส แต่ต่ำกว่าระดับที่ทำให้เม็ดแปงพองตัว ต่อมาจึงวัดระดับความหนืด หรือทดสอบคุณสมบัติทางวิทยากระแส เพื่อวัดระดับของการเกิดครอสลิงค์ เมื่อถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาโดยปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยกรดเจือจาง แล้วกรองเกลือ หรือสารเคมีที่ไม่ทำปฏิกิริยาและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออก ล้าง และอบแห้ง (Wurzberg, 1986; Rutenberg and Solarek, 1984)

Kerr and Cleveland (1957) รายงานว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมข้าม ได้แก่ ปริมาณสาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณเกลือ อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาระหว่างแปงกับ STMP จะเกิดอย่างมีประสิทธิภาพที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 11.0 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ถ้าใช้ปริมาณ STMP ร้อยละ 0.03 ของน้ำหนักแปงแห้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 11.0 เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง จะได้แปงตัดแปรที่ไม่เป็นเจลในน้ำเดือด จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ถ้าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณสารเพิ่มขึ้น การใช้เกลือในรูปของโซเดียมไอออนที่ได้จากโซเดียมคลอไรด์ หรือโซเดียมคาร์บอเนต จะช่วยให้การพองตัวของเม็ดแปงลดลงในสภาพต่างระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เป็นการลดการเกิดเจลาคติในเซชันของแปงในสภาพที่มีความเข้มข้นของด่างสูง (Knight, 1969)

### 3.2.2 คุณสมบัติและการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างภายนอกของเม็ดแป้งครอสลิงค์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง พันธะเคมีที่เกิดขึ้นจะเสริมพันธะไฮโดรเจนทำให้เม็ดแป้งแข็งแรงและเสถียรมากขึ้น ไม่แตกง่าย มีการละลายลดลง มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์สูงขึ้น แป้งเปียกมีความต้านทานต่อแรงเฉือน และความเป็นกรดมากขึ้น ลักษณะเนื้อครีมเนียนคล้ายขี้ผึ้ง ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นในอาหาร เหมาะสำหรับใช้ผลิตอาหารที่มีสภาพเป็นกรด ใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และมีแรงเฉือนจากการกวนของเครื่องมือ หรือส่งผ่านตามท่อโดยใช้ปั๊ม รวมทั้งชะลอการเกิดเจลลาติไนเซชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความข้นหนืดตามที่ต้องการเมื่อเย็นตัวลง (Wurzburg, 1986) ฟิล์มที่ได้จากแป้งครอสลิงค์มีคุณสมบัติที่ดี มีความหนืดคงตัว เหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Kirby, 1986)

ในการผลิตร่วมกับกระบวนการตัดแปรอื่น ๆ พร้อม ๆ กันหรือต่อเนื่องกัน เช่น การตัดแปรด้วยกรด การออกซิเดชัน การเกิดสารอนุพันธ์ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งให้เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ยิ่งขึ้น (Wurzburg, 1986) แป้งตัดแปรครอสลิงค์ร่วมกับเอซิติเลชันจะทำให้แป้งมีความหนืดคงตัวดีขึ้น เหมาะสำหรับผลิตอาหารที่มีสภาพเป็นกรด ต้องผ่านความร้อนสูงเป็นเวลานาน และต้องเก็บรักษาในสภาพแช่เย็นเป็นเวลานานโดยสามารถรักษาความข้นหนืดไว้ได้ เช่น ซุป ซอส น้ำสลัด ไส้พาย อาหารเด็กอ่อน รวมทั้งช่วยให้เกิดการยึดเกาะอาหารได้ดีขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารซุบแป้งทอด (Imeson, 1992) แป้งตัดแปรครอสลิงค์ร่วมกับแคลทไอออนไนเซชัน มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้ผลิตกระดาษ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการยึดติดสูง สามารถใช้ที่ระดับความเข้มข้นเจือจางได้ (Quan *et al.*, 1997)

ในอุตสาหกรรมอาหาร อาศัยคุณสมบัติของแป้งครอสลิงค์ที่ไม่สูญเสียความหนืดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ นำมาใช้เป็นสารให้ความข้นสำหรับอาหารที่มีความเป็นกรดสูง เช่น ซอส น้ำสลัด และอาศัยคุณสมบัติของแป้งที่มีอัตราการพองตัว และการเกิดเจลลาติไนเซชันลดลงที่อุณหภูมิสูง นำมาใช้กับอาหารกระป๋องที่ต้องการความร้อนสูง และต้องการความหนืดต่ำในช่วงแรก ซึ่งทำให้การนำความร้อนในกระป๋องเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาในการฆ่าเชื้อน้อยลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดตามต้องการเมื่อเย็นตัวลง (Rutenberg and Solarek, 1984) นอกจากนี้ยังใช้ผลิตอาหารว่างได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโพรงอากาศละเอียด และสม่ำเสมอกว่าผลิตโดยใช้แป้งดิบ (ดวงใจ, 2536) แป้งครอสลิงค์ยังสามารถใช้เป็นสารทำให้เกิดความคงตัวในซอสมะเขือเทศ ทำให้

ขอสมมุติเชื่อกันว่ามีความหนืดและคุณภาพทางประสาทสัมผัสเหมาะสม และรักษาความคงตัวในซอส  
มะเขือเทศได้เป็นเวลานาน (วรรณพร, 2538)

### 3.3 แป้งครอสลิงค์-พรีเจล (crosslinked-pregelatinized starch)

จากคุณสมบัติเด่นของแป้งครอสลิงค์ที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูง สภาวะความเป็นกรด และแรงเฉือน และยังสามารถปรับปรุงคุณลักษณะความหนืดและเนื้อสัมผัสของแป้งดิบได้ จึงได้มีการนำแป้งครอสลิงค์มาทำการดัดแปรด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น การทำแป้งพรีเจล

Nabeshima and Grossmann (2001) ได้เตรียมแป้งครอสลิงค์จากแป้งมันสำปะหลังด้วย STMP ในสถานะที่เป็นผง จากนั้น นำไปผ่านเครื่องอัดรีดเพื่อผลิตเป็นแป้งพรีเจล ได้แป้งที่มีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิและแรงเฉือน สามารถลดความเหนียวของแป้งเปียก และความใสเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ McPherson and Jane (2000) ได้เตรียมแป้งพรีเจลด้วยเครื่องอัดรีดจากแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวโพด หลังจากทำให้เกิดการแทนที่ด้วยไฮดรอกซีโพรพิเลตที่ความเข้มข้นต่างกัน เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะความหนืดของแป้ง นอกจากนี้ พรณอร และพจน์ (2553) ได้ดัดแปรแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการทำปฏิกิริยาการแทนที่ร่วมกับปฏิกิริยาเชื่อมข้าม และนำไปผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเพื่อผลิตแป้งพรีเจล ได้แป้งที่สามารถละลายและพองตัวได้ในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง มีความคงทนต่อกรด ความร้อน และแรงกระทำ เหมาะสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ทางเภสัชกรรม

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัตถุดิบ

ฟลาวข้าวแอมิโลสสูง (HA rice flour) และฟลาวข้าวแอมิโลสต่ำ (LA rice flour) ซื้อมาจากบริษัท ขอสง โรงเส้นหมี่ จำกัด และข้าวหอมมะลิ ซื้อมาจากบริษัท เจียเม็งมาร์เก็ตติ้ง จำกัด

#### 2. อุปกรณ์

- 2.1 อุปกรณ์สำหรับสกัดแป้ง
- 2.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
- 2.3 มอเตอร์กวน (stirring motor)
- 2.4 เครื่องปั๊มน้ำ (peristaltic pump)
- 2.5 เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifuge)
- 2.6 ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (hot air oven)
- 2.7 เครื่องชั่งวิเคราะห์อย่างละเอียด
- 2.8 เครื่องวัดความหนืดแป้ง Rapid Visco Analyzer, RVA
- 2.9 เครื่องวัดความหนืดแป้ง Brookfield viscometer
- 2.10 กล้องจุลทรรศน์ (light microscope)
- 2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscope)
- 2.12 เครื่องปั่นผสมไฟฟ้า (blender)
- 2.13 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)
- 2.14 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)
- 2.15 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray Diffractometer)
- 2.16 เครื่องแก้วต่าง ๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์

## วิธีการ

### 1. การเตรียมฟลาวข้าวแอมิโลสปานกลาง

ทำการเตรียมฟลาวข้าวแอมิโลสปานกลาง (MA rice flour) โดยนำเมล็ดข้าวหอมมะลิมาผ่านกรรมวิธีการโม่เปียก (wet mill) กรองน้ำแป้งออก แล้วนำแป้งหมาดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการสกัดแป้งข้าวแอมิโลสปานกลาง (MA rice starch) ต่อไป

### 2. การเตรียมแป้งข้าวแอมิโลสสูง ปานกลาง และต่ำ

ทำการเตรียมแป้ง HA, MA และ LA จากฟลาวข้าวทั้ง 3 ชนิด โดยดัดแปลงจากวิธีของ Sawai and Morita (1968) ดังภาพที่ 15 ทำการสกัดโปรตีนออกให้มีปริมาณน้อยกว่า ร้อยละ 0.50 โดยกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.35 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายต่าง และดูดแยกชั้น โปรตีนที่ผิวหน้าออก ทำการสกัดโปรตีนออกอีกครั้ง ปรับสารละลายแป้งให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 0.35 ถ้างตะกอนเกลือที่เกิดขึ้นด้วยน้ำ อบตะกอนแป้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แป้งที่ได้จะถูกนำมาอบและผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เพื่อทำการวิเคราะห์และเตรียมแป้งดัดแปรในขั้นตอนต่อไป

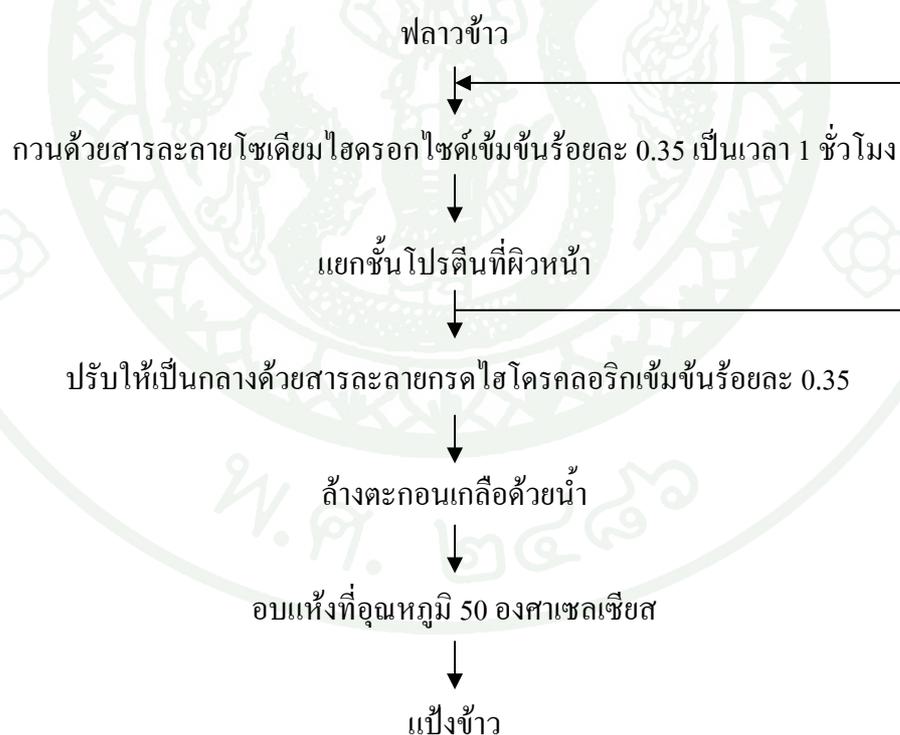
### 3. วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (ใช้ factor = 5.95) ปริมาณไขมัน ปริมาณแป้ง ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC method (AOAC, 1990) แสดงวิธีการวิเคราะห์ในภาคผนวก

### 4. การเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น

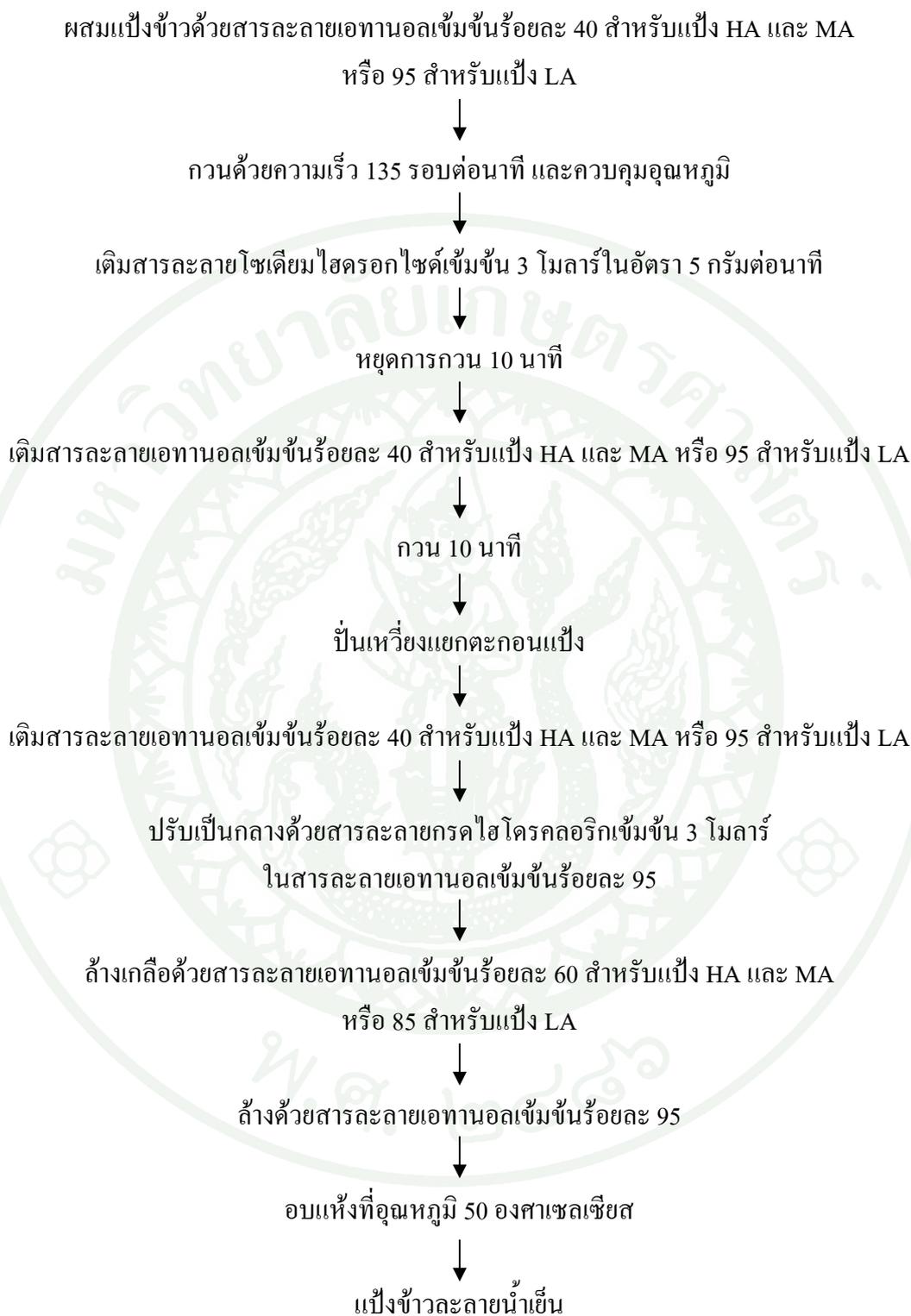
วิธีการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวทั้ง 3 ชนิด ได้ดัดแปลงจากวิธีการของ Singh and Singh (2003) ดังภาพที่ 16 โดยแป้ง HA และ MA ทำการแขวนลอยแป้งในสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 หรือ 30 องศาเซลเซียส กวนด้วยความเร็ว 135 รอบต่อ

นาที่ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ ด้วยอัตรา 5 กรัมต่อนาที ระยะเวลาการเติมขึ้นอยู่กับปริมาณด่างที่ใช้ โดยทำการแปรสัดส่วนด่างที่ใช้ระหว่าง 1.0-3.0, 2.0-3.0 และ 3.0-5.0 ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง สำหรับแป้ง HA, MA และ LA ตามลำดับ หยุดการกวนนาน 10 นาที จากนั้นผสมสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักอีกครั้ง กวนส่วนผสมเป็นเวลา 10 นาที แยกตะกอนแป้งที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ผสมตะกอนแป้งด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลาร์ในเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ล้างเกลือที่เกิดขึ้นด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 60 และ 95 ตามลำดับ นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แป้งที่ได้จะถูกนำมาบดและผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป สำหรับแป้งข้าวปริมาณแอมิโลสทำให้แขวนลอยแป้งในสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 เติมน้ำสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 และล้างเกลือด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 85 และ 95 ตามลำดับ



ภาพที่ 15 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าว

ที่มา: คัดแปลงจาก Sawai and Morita (1968)

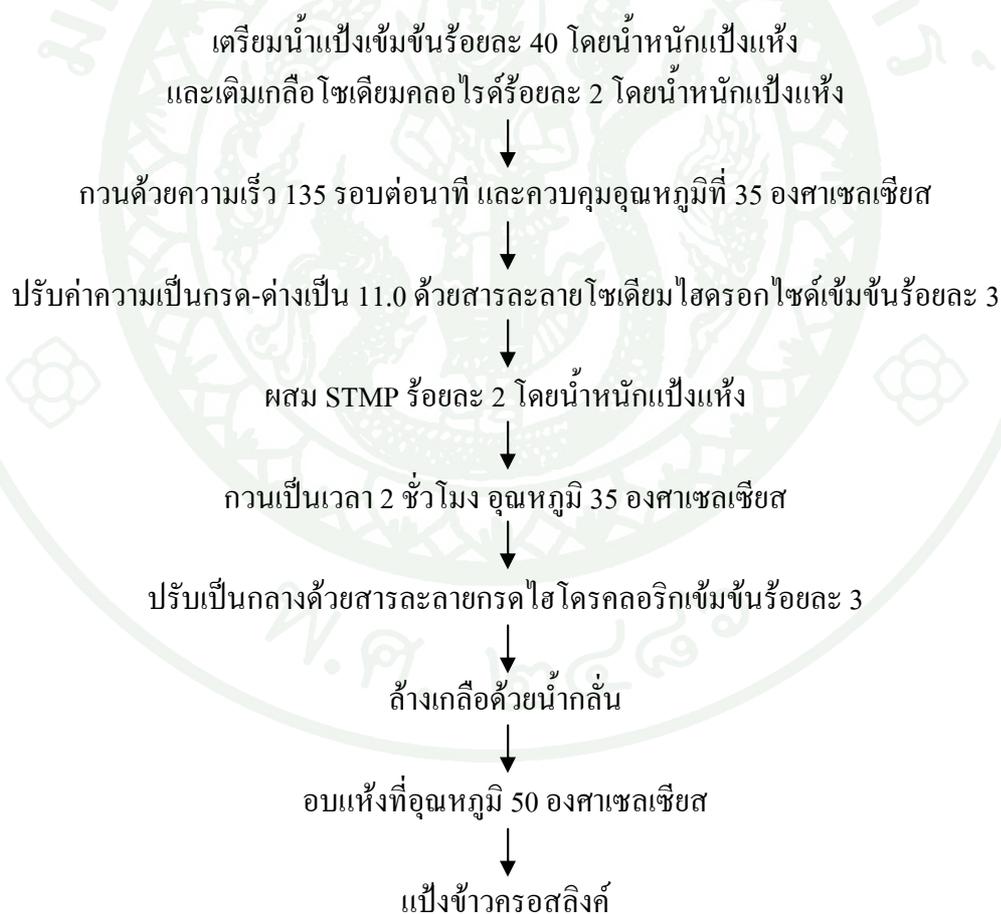


ภาพที่ 16 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าวละลายน้ำเย็น

ที่มา: คัดแปลงจาก Singh และ Singh (2003)

## 5. การเตรียมแป้งครอสติงค์

การเตรียมแป้ง HA-CL และ LA-CL ตามวิธีการของ (Woo and Seib, 1997) ดังภาพที่ 17 โดยเลือกสภาวะการเตรียมที่ความเข้มข้นของ STMP ร้อยละ 2 ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง และโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 2 ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 11.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 ทำการกวนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 6.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 3 ปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนแป้ง ล้างตะกอนแป้งด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างเกลือที่เกิดขึ้น นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แป้งที่ได้จะถูกนำมาบดและผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เพื่อทำการวิเคราะห์และเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการเตรียมแป้งข้าวครอสติงค์

ที่มา: Woo and Seib (1997)

## 6. การเตรียมแป้งดัดแปรร่วม (dual modification)

นำแป้ง HA-CL และ LA-CL ที่ได้จากหัวข้อที่ 5 มาเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง ที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Singh and Singh (2003) ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4 เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการแปรสัดส่วนด่างที่ใช้ระหว่าง 10.0-12.0 และ 3.0-4.0 ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง สำหรับแป้ง HA-CL และ LA-CL ตามลำดับ แป้งที่เตรียมได้จะถูกนำมาบดและผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh เพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

## 7. การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Cold Water Soluble Starch , %CWS)

วิธีการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้งได้ดัดแปลงจาก Eastman and Moor (1984) โดยผสมแป้งตัวอย่าง 1 กรัม น้ำหนักแห้ง ด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ 60 นาที และกวนทุก ๆ 15 นาที นำไปปั่นด้วยเครื่องผสมนาน 2 นาที เหยียงสารละลายแยกส่วนใสด้วยความเร็วรอบ 1,200xg เป็นเวลา 15 นาที คูตส่วนใสปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่จานอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเปรียบเทียบกับแป้งดิบ และแป้งเปียกของแป้งข้าวชนิดเดียวกันที่เตรียมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ที่ความเข้มข้นเดียวกัน และทำการคำนวณค่า %CWS ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{CWS} = \frac{(\text{น้ำหนักงานและน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} - \text{น้ำหนักงาน}) \times 2 \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

## 8. การวิเคราะห์ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase (solubility, swelling power และ volume fraction, $\phi$ )

วิธีการวิเคราะห์ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase (solubility, swelling power และ volume fraction,  $\phi$ ) ได้ดัดแปลงจากวิธีของ Sanchez *et al.* (2010) โดยชั่งแป้งตัวอย่าง 0.28 กรัม น้ำหนักแห้ง ผสมด้วยน้ำ 27.72 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งไว้ 30 นาที และกวนด้วยแท่งแก้วคนทุก ๆ 5 นาที เทใส่หลอดเซนตริฟิวจ์ที่ทราบน้ำหนัก แล้วจึงปั่นเหยียงด้วยความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที คูตส่วนใสใส่จานอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก

นำส่วนใสและชั้นแป้งเปียก (dispersed phase) ที่ได้มาซึ่งน้ำหนักก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ทำการเปรียบเทียบกับแป้งเปียกของแป้งข้าวชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นเดียวกัน ที่เตรียมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทำการวิเคราะห์ผลดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

$$\text{กำลังการพองตัว (กรัม/กรัมแป้ง)} = \frac{\text{น้ำหนัก dispersed phase} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

$$\text{สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase } (\phi) = \frac{27.91 - (\text{น้ำหนักส่วนใส} - \text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง})}{27.91}$$

ค่าแฟคเตอร์ 27.91 ได้จากการคำนวณค่าปริมาตรทั้งหมด (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ของแป้งเปียก โดยค่าความหนาแน่นของแป้งมีค่าเท่ากับ 1.5 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น

$$27.91 = 27.72 + (0.28/1.5) \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

## 9. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

การวัดปริมาณแอมิโลสด้วยการเกิดสีกับไอโอดีน (Juliano, 1971) ซึ่งตัวอย่างแป้งข้าวจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ เพื่อให้แป้งหุ้มแอลกอฮอล์และกระจายตัว หลังจากนั้นเติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 9 มิลลิลิตร นำขวดปรับปริมาตรที่มีตัวอย่างลงไปแช่ในอ่างน้ำร้อน โดยเขย่าบ้างเป็นครั้งคราว นานประมาณ 10 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรสารละลายตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ดูดสารละลายตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และเติมน้ำละลายไอโอดีนร้อยละ 0.2 -

โพแทสเซียมไอโอไดด์ร้อยละ 2 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เทียบกับกราฟมาตรฐานของแอมิโลสของมันฝรั่ง (Potato amylose, type II) เข้มข้น 4, 6, 12, 16 และ 20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

#### 10. ลักษณะรูปร่าง การเกิดกากบาท (maltese cross) และ birefringence

วิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งข้าวตัดแปรที่ผลิตได้ภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarize light) ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50x

#### 11. ลักษณะรูปร่าง และขนาดอนุภาคเม็ดแป้ง

วิเคราะห์ลักษณะเม็ดแป้งข้าวตัดแปรที่ผลิตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning Electron Microscope) ควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 3,000 ตามวิธีการของ Wakler (1976)

#### 12. ลักษณะโครงสร้างผลึก

ซึ่งตัวอย่างแป้ง (ค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8-10) ประมาณ 5 กรัม บรรจุลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง ทำผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งด้วยเครื่อง X-ray power diffractometer โดยใช้สภาวะของการทดสอบ คือ ใช้ Target เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 5.00-40.00 องศา 2-theta ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศา 2-theta ต่อนาที ทำการบันทึกรูปแบบของ X-ray diffraction ที่ได้

#### 13. สมบัติการเกิดเจลาตีไนเซชัน (gelatinization) และการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

วิเคราะห์การเกิดเจลาตีไนเซชันของสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ที่ช่วงอุณหภูมิ 40-110 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตามวิธีของ Siroth *et al.* (1999) ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่

จุดเริ่มต้น (Onset temperature;  $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (Peak temperature;  $T_p$ ) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (Conclusion temperature;  $T_c$ ) ของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (หน่วยเป็นองศาเซลเซียส) และความร้อนทั้งหมดของปฏิกิริยา (enthalpy;  $\Delta H$ ) (หน่วยเป็นจูลต่อกรัม)

นำสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแห้ง หลังจากการเกิดเจลลาติโนเซชันมาเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน เพื่อวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชัน ตามวิธีของ Jang and Pyun (1997) และแสดงค่าความสามารถการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นร้อยละดังสมการ

$$\text{ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน (\%)} = \frac{\text{เอนทัลปีของแป้งรีโทรเกรด} \times 100}{\text{เอนทัลปีของแป้งดิบ}}$$

#### 14. การวิเคราะห์ความหนืดด้วย Rapid Visco Analyzer

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้งด้วยเครื่อง Rapid Viscosity Analyzer (RVA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้น 20 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที 14 วินาที เพิ่มอุณหภูมิจาก 20 เป็น 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 0.20 องศาเซลเซียสต่อวินาที รักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที 30 วินาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 0.20 องศาเซลเซียสต่อวินาที และรักษาระดับอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

#### 15. การวิเคราะห์ความหนืดด้วย Brookfield Viscometer

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายแป้งด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็ว 10, 20 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที หัวเข็มหมายเลข 27 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาคงตัวของแป้งเปียกได้ทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ Bello-Pérez *et al.* (2000) โดยใช้ความเร็วรอบคงที่ 60 รอบต่อนาที หัวเข็มหมายเลข 27 และทำการบันทึกค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที ทำการเปรียบเทียบกับแป้งเปียกของแป้งข้าวชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นเท่ากัน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

## 16. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ )

## 17. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการฝ่ายเทคโนโลยีแปรรูปน้ำตาล และยางพารา สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 18. ระยะเวลาทำการวิจัย

ตั้งแต่ต้นเดือนตุลาคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554

## ผลและวิจารณ์

### 1. องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA, MA และ LA

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ แป้ง โปรตีน ใย และไขมัน จากแป้งข้าว HA, MA และ LA พบว่า แป้งข้าวทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณแป้งระหว่างร้อยละ 92.54-97.57 โดยน้ำหนักแห้ง โปรตีนระหว่างร้อยละ 0.03-0.15 โดยน้ำหนักแห้ง ใยระหว่างร้อยละ 0.27-0.31 โดยน้ำหนักแห้ง และไขมันระหว่างร้อยละ 0.10-0.25 โดยน้ำหนักแห้ง แสดงดังตารางที่ 4 ในการสกัดแป้งพบว่า แป้งที่ได้มีโปรตีนน้อยกว่าร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากโปรตีนในข้าวถูกสกัดออกโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (รุ่งทิวา, 2543; Matsuo *et al.*, 1997) ทำให้แป้งทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณแป้งสูง (มากกว่าร้อยละ 92 โดยน้ำหนักแห้ง)

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (amylose content) ของแป้งข้าว (rice starch) ทั้ง 3 ชนิดโดยวิธีวิเคราะห์การเกิดสีกับไอโอดีนตามวิธีของ Juliano (1971) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่ามีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบคิดเป็นร้อยละ 39.13, 24.02 และ 9.21 ตามลำดับ จึงเป็นไปได้ตามการจำแนกชนิดข้าวของ Juliano (1984) ที่จำแนกตามปริมาณองค์ประกอบของแอมิโลส ดังนี้ ข้าวแอมิโลสสูงมีองค์ประกอบของแอมิโลสมากกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง ข้าวแอมิโลสปานกลางมีองค์ประกอบของแอมิโลสระหว่างร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนักแห้ง และข้าวแอมิโลสต่ำมีองค์ประกอบของแอมิโลสระหว่างร้อยละ 9-20 โดยน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง HA, MA และ LA

แป้ง	ความชื้น	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				
		แอมิโลส	แป้ง	โปรตีน	เถ้า	ไขมัน
HA	10.18±0.03 <sup>b</sup>	39.13±0.13 <sup>a</sup>	92.54±0.49 <sup>c</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.01 <sup>ns</sup>	0.25±0.04 <sup>a</sup>
MA	9.75±0.07 <sup>c</sup>	24.02±0.24 <sup>b</sup>	97.56±0.66 <sup>a</sup>	0.03±0.00 <sup>c</sup>	0.03±0.01 <sup>ns</sup>	0.10±0.03 <sup>b</sup>
LA	11.63±0.00 <sup>a</sup>	9.21±0.85 <sup>c</sup>	95.71±0.40 <sup>b</sup>	0.08±0.00 <sup>b</sup>	0.03±0.01 <sup>ns</sup>	0.23±0.03 <sup>b</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )  
 ns คือ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

## 2. ผลการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง (alcoholic-alkaline treatment)

### 2.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เถ้า และค่า %CWS

สถานะในการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS แสดงดังตารางที่ 5 โดยนำแป้งดิบมาแขวนลอยด้วยสารละลายเอทานอลที่สัดส่วน 1:20 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง (การเตรียมแป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS ใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 และแป้ง LA-GCWSS ใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95) ที่อุณหภูมิการเตรียม และสัดส่วนของ 3 M NaOH ดังนี้ แป้ง HA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง แป้ง MA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และเตรียมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0, 4.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ทั้งนี้ ที่สถานะการเตรียมดังกล่าว มีสัดส่วนโดยมวลและสัดส่วนโดยโมลของแป้ง น้ำ เอทานอล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 5

ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (yield) ที่ได้จากการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สถานะต่างกัน แสดงดังตารางที่ 6 โดยมีค่าระหว่างร้อยละ 88.75-93.12, 89.79-90.45 และ 88.64-95.84 ตามลำดับ การเตรียมแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 95.84

ปริมาณเถ้าของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สถานะการเตรียมต่างกัน แสดงดังตารางที่ 6 โดยมีค่าระหว่างร้อยละ 0.08-0.10, 0.10-0.18 และ 0.22-6.36 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าของแป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีค่าร้อยละ 0.04, 0.03 และ 0.03 ตามลำดับ การเตรียมแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีปริมาณเถ้าสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 6.36 ปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นในแป้งละลายน้ำเย็นเกิดจากเกลือที่หลงเหลืออยู่ภายในเม็ดแป้ง ซึ่งมีผลให้เนื้อสัมผัสของแป้งเปียก

มีความเนียน และช่วยให้การเตรียมแป้งเปียกทำได้ง่ายขึ้น (Chen and Jane, 1994b) การเตรียมแป้ง MA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส เมื่อสัดส่วนของ 3 M NaOH คงที่ (2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) มีปริมาณเถ้าคิดเป็นร้อยละ 0.11 และ 0.10 ตามลำดับ Bello-Pérez *et al.* (2000) ได้คัดแปรแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งกล้วยด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับค้างพบว่า ที่สัดส่วนโดยมวลของแป้งต่อน้ำต่อสารละลายเอทานอลต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คงที่ เมื่ออุณหภูมิในการเตรียมเพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าของแป้งละลายน้ำเย็นจะมีค่าลดลง ผลการศึกษานี้ไม่สอดคล้องกับการเตรียมแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส เมื่อสัดส่วนของ 3 M NaOH คงที่ (3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) พบว่า ปริมาณเถ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.22 เป็น 6.36 ตามลำดับ

ค่า %CWS ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS แสดงดังตารางที่ 6 มีค่าระหว่างร้อยละ 94.31-97.59, 96.95-101.65 และ 90.36-95.64 ตามลำดับ แป้งเปียกของแป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีค่า %CWS เท่ากับ 94.25, 96.43 และ 104.03 ตามลำดับ ขณะที่แป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีค่า %CWS เท่ากับ 1.46, 0.85 และ 1.36 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ และแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ค่า %CWS สูงที่สุดเท่ากับ 97.59, 101.65 และ 95.64 และใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแป้งเปียกของแป้งดิบ

สำหรับแป้งข้าวชนิดเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นคงที่ ปริมาณของ 3 M NaOH ที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่า %CWS เพิ่มขึ้น จากการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่า %CWS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.46 เป็น 97.59, 55.65 เป็น 98.17 และ 17.79 เป็น 90.36 เมื่อสัดส่วนของ 3 M NaOH เพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 2.0, 2.0 เป็น 2.5 และ 3.0 เป็น 4.0 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen and Jane (1994a); Kaur *et al.* (2010) ทั้งนี้ การพองตัวของเม็ดแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปเอมิโลเพกตินสายสั้นภายในเม็ดแป้งจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ทำให้แป้งไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น เมื่อคัดแปรแป้งด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับค้าง พบว่า ค้างจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเกลียวคู่ โดยไปจับกับโปรตอนของโมเลกุลแป้งทำให้โมเลกุลแป้งมีประจุลบ และเกิดการผลักกัน

ของเกลียวคู่กลายเป็นเกลียวเดี่ยว โครงสร้างของแป้งในลักษณะนี้มีผลให้แป้งสามารถละลายในน้ำเย็นได้ (Rajagopalan and Seib, 1992)

อุณหภูมิในการตัดแปรแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง มีผลต่อค่า %CWS เช่นเดียวกัน จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเตรียม MA-GCWSS และ LA-GCWSS จาก 25 เป็น 30 องศาเซลเซียส เมื่อสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ พบว่า ค่า %CWS จะเพิ่มขึ้นจาก 55.65 เป็น 96.95 และ 17.79 เป็น 95.64 ตามลำดับ อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เม็ดแป้งมีการขยายตัวและบวมมากขึ้น โซเดียมไฮดรอกไซด์จึงสามารถแทรกเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งได้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่า %CWS เพิ่มขึ้น (Chen and Jane, 1994a; Bello-Pérez *et al.*, 2000)

สำหรับการเตรียมแป้ง LA-GCWSS พบว่า เมื่อเตรียมด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40, 60, 80 และ 90 พบว่าแป้งเกิดเจลลาตินไนซ์ ไม่สามารถคงลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้งได้ (ไม่ได้แสดงข้อมูลในตารางที่ 5) Chen and Jane (1994a) ได้เตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 สัดส่วนโดยมวลของแป้งต่อสารละลายเอทานอลต่อ 3 M NaOH เป็น 1:7.0:5.0 พบว่า แป้งเกิดเจลลาตินไนซ์ แต่เมื่อเตรียมด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ สัดส่วนโดยมวลของแป้งต่อเอทานอลต่อ 3 M NaOH เป็น 1:7.0:3.2 แป้งตัดแปรที่ได้ให้ค่า %CWS เท่ากับ 93.70 ซึ่งการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นโดยใช้สารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูง ๆ จะมีผลไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้ง (โดยเอทานอลจะแย่งจับกับน้ำในระบบ ทำให้ปริมาณน้ำในระบบลดลง) การพองตัวของเม็ดแป้งจึงเป็นไปอย่างจำกัด เม็ดแป้งจะยังคงโครงสร้างเป็นเม็ดในระหว่างการเตรียมแป้ง และเนื่องจากเม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นสายเกลียวเดี่ยว ซึ่งมีประจุลบทำให้ภายในเกลียวนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำ แอลกอฮอล์ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากกว่าน้ำ จึงเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเม็ดแป้งที่มีโครงสร้างของสายโซ่กลูแคนเป็นสายเกลียวเดี่ยวได้ (Chen and Jane, 1994b) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้เตรียมแป้ง LA-GCWSS โดยแขวนลอยแป้ง LA ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 5.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ค่า %CWS เท่ากับ 8.13 และเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลลงเป็นร้อยละ 95 พบว่า ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ได้แป้งละลายน้ำเย็นที่ให้ค่า %CWS เท่ากับ 90.36

แอมิโลสที่เกิดการพันเกลียวกับแอมิโลเพกตินจะขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งที่แขวนลอยในสารละลายแอลกอฮอล์ระหว่างการให้ความร้อน (Jane *et al.*, 1986) ในแป้งแอมิโลสปานกลาง แอมิโลสจะกระจายตัวอยู่ระหว่างแอมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้ง (Jane *et al.*, 1992; Kasemsuwan and Jane, 1994) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบของแป้งเพิ่มขึ้น (Banks *et al.*, 1973) อย่างไรก็ตาม แป้ง LA มีปริมาณแอมิโลสที่พันเกลียวกับแอมิโลเพกตินน้อย จึงเกิดเจลาตินไนซ์เมื่อตัดแปรด้วยสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 40) ขณะที่แป้ง HA และ MA ยังคงรักษาสภาพความเป็นเม็ดแป้งไว้ได้ตลอดกระบวนการเตรียมแป้งตัดแปร

ดังนั้น การผลิตแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับค่าประสิทธิภาพ และคุณภาพของการผลิต จะขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบ และสภาวะการผลิต ได้แก่ ความเข้มข้นและชนิดของแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Jane and Seib, 1991) ที่ต้องสอดคล้องกับวัตถุดิบแต่ละชนิดที่มีความยากง่ายในการเกิดปฏิกิริยาต่างกัน

ตารางที่ 5 สัดส่วนโดยมวล สัดส่วนโดยโมลของแป้ง น้ำ เอทานอล และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีการแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH และอุณหภูมิในการเตรียมที่ต่างกัน

แป้ง ข้าว	สภาวะการเตรียม				สัดส่วนโดยมวล					สัดส่วนโดยโมล			ระยะเวลาการ ทำปฏิกิริยา <sup>2</sup> (นาที)
	แป้ง (กรัม)	สารละลาย เอทานอล <sup>1</sup> (กรัม)	3 M NaOH (กรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	แป้ง	น้ำ	เอทานอล	โซเดียม ไฮดรอกไซด์	แป้ง	น้ำ	เอทานอล	โซเดียม ไฮดรอกไซด์	
HA	1	20	1.0	25	1	12.89	8.00	0.11	1	119.38	28.99	0.45	20
	1	20	2.0	25	1	13.79	8.00	0.21	1	127.65	28.99	0.89	40
	1	20	3.0	25	1	14.68	8.00	0.32	1	135.91	28.99	1.34	60
MA	1	20	2.0	25	1	13.79	8.00	0.21	1	127.65	28.99	0.89	40
	1	20	2.5	25	1	14.23	8.00	0.27	1	131.78	28.99	1.12	50
	1	20	3.0	25	1	14.68	8.00	0.32	1	135.91	28.99	1.34	60
	1	20	2.0	30	1	13.79	8.00	0.21	1	127.65	28.99	0.89	40
LA	1	20	3.0	25	1	3.68	19.00	0.32	1	34.06	68.84	1.34	60
	1	20	4.0	25	1	4.57	19.00	0.43	1	42.33	68.84	1.79	80
	1	20	5.0	25	1	5.46	19.00	0.54	1	50.60	68.84	2.23	100
	1	20	3.0	30	1	3.68	19.00	0.32	1	34.06	68.84	1.34	60

หมายเหตุ: <sup>1</sup>สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 สำหรับเตรียม HA-GCWSS และ MA-GCWSS และร้อยละ 95 สำหรับเตรียม LA-GCWSS

<sup>2</sup>ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาคิดที่ปริมาณแป้งดิบน้ำหนัก 100 กรัม

น้ำหนักโมเลกุลของแป้ง น้ำ เอทานอล และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 162, 18, 46 และ 40 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เถ้า และค่า %CWS ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน

แป้ง	สภาวะการเตรียม		ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	ร้อยละเถ้า	ร้อยละความสามารถในการละลายน้ำเย็น (%CWS)
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
HA	1.0	25	91.52±1.47 <sup>ab</sup>	0.10±0.00 <sup>ef</sup>	1.46±0.02 <sup>g</sup>
HA	2.0	25	88.75±1.30 <sup>b</sup>	0.08±0.00 <sup>f</sup>	97.59±1.44 <sup>bc</sup>
HA	3.0	25	91.62±1.64 <sup>ab</sup>	0.12±0.01 <sup>c</sup>	94.31±1.04 <sup>cd</sup>
แป้งดิบ	-	-	-	0.04±0.01 <sup>g</sup>	1.46±0.64 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	-	-	94.25±8.27 <sup>cd</sup>
MA	2.0	25	89.79±0.99 <sup>b</sup>	0.11±0.01 <sup>ef</sup>	55.65±0.48 <sup>c</sup>
MA	2.5	25	89.47±0.92 <sup>b</sup>	0.12±0.01 <sup>c</sup>	98.17±0.52 <sup>bc</sup>
MA	3.0	25	90.45±1.67 <sup>ab</sup>	0.18±0.00 <sup>d</sup>	101.65±2.25 <sup>ab</sup>
MA	2.0	30	91.24±1.51 <sup>ab</sup>	0.10±0.00 <sup>ef</sup>	96.95±1.06 <sup>c</sup>
แป้งดิบ	-	-	-	0.03±0.01 <sup>g</sup>	0.85±0.24 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	-	-	96.43±0.39 <sup>c</sup>
LA	3.0	25	93.27±0.76 <sup>a</sup>	0.22±0.00 <sup>c</sup>	17.79±0.17 <sup>f</sup>
LA	4.0	25	89.64±0.57 <sup>b</sup>	4.23±0.01 <sup>b</sup>	90.36±0.90 <sup>d</sup>
LA	5.0	25	n.d.	n.d.	n.d.
LA	3.0	30	95.34±1.65 <sup>a</sup>	6.36±0.03 <sup>a</sup>	95.64±0.02 <sup>c</sup>
แป้งดิบ	-	-	-	0.03±0.01 <sup>g</sup>	1.36±0.35 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	-	-	104.03±4.45 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากเมล็ดแป้งเกิดการแตกตัว

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

## 2.2 ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ )

ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS แสดงดังตารางที่ 7 โดยมีค่าการละลายระหว่างร้อยละ 0.86-14.80, 9.83-13.83 และ 3.31-24.02 ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้งดิบของแป้ง HA, MA และ LA มีค่าการละลายคิดเป็นร้อยละ 16.32, 9.77 และ 34.06 ตามลำดับ ขณะที่ แป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีค่าการละลายคิดเป็นร้อยละ 1.27, 0.93 และ 0.51 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 และ 2.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ และแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ค่าการละลายสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 14.80, 13.83 และ 24.02 ตามลำดับ ค่าการละลายสูงสุดของแป้ง HA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าสูงกว่าแป้งเปียกของแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน ขณะที่แป้ง MA-GCWSS มีค่าต่ำกว่าแป้งเปียกของแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน แป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS สูงสุด จะให้ค่าการละลายใกล้เคียงกับค่าการละลายสูงสุด

กำลังการพองตัวของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าระหว่าง 2.39-18.20, 10.66-20.21 และ 4.45-22.19 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้งดิบของแป้ง HA, MA และ LA มีค่ากำลังการพองตัวเท่ากับ 13.59, 21.33 และ 20.45 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ ขณะที่ แป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีค่ากำลังการพองตัวเท่ากับ 2.70, 2.64 และ 2.65 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง แป้ง MA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง จะให้ค่ากำลังการพองตัวสูงที่สุดเท่ากับ 18.20, 20.21 และ 22.19 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ ค่ากำลังการพองตัวสูงสุดของแป้ง HA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าสูงกว่าแป้งเปียกจากแป้งดิบของแป้งข้าวชนิดเดียวกัน ขณะที่ แป้ง MA-GCWSS มีค่าต่ำกว่าแป้งเปียกจากแป้งดิบของแป้งข้าวชนิดเดียวกัน แป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS สูงสุด จะให้ค่ากำลังการพองตัวใกล้เคียงกับค่ากำลังการพองตัวสูงสุด

สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าระหว่างร้อยละ 0.03-0.17, 0.12-0.19 และ 0.06-0.19 ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้งดิบของแป้ง HA, MA และ LA มีค่าสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) คิดเป็นร้อยละ 0.13, 0.21 และ 0.27 ตามลำดับ ขณะที่ แป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีค่าสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) คิดเป็นร้อยละ 0.05, 0.04 และ 0.04 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง แป้ง MA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.17, 0.19 และ 0.19 ตามลำดับ สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) สูงสุดของแป้ง HA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าสูงกว่าแป้งเปียกของแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน ขณะที่ แป้ง MA-GCWSS มีค่าต่ำกว่าแป้งเปียกของแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน แป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS สูงสุด จะให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ใกล้เคียงกับค่าสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ )

ตารางที่ 7 ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน

แป้ง	สภาวะการเตรียม		ร้อยละการละลาย	กำลังการพองตัว (กรัมต่อกรัมแป้ง)	สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ )
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
HA	1.0	25	0.86±0.06 <sup>j</sup>	2.39±0.08 <sup>k</sup>	0.03±0.00 <sup>k</sup>
HA	2.0	25	11.48±0.45 <sup>g</sup>	15.13±0.22 <sup>g</sup>	0.16±0.01 <sup>f</sup>
HA	3.0	25	14.80±0.23 <sup>d</sup>	18.20±0.18 <sup>c</sup>	0.17±0.00 <sup>c</sup>
แป้งดิบ	-	-	1.27±0.02 <sup>j</sup>	2.70±0.04 <sup>k</sup>	0.04±0.00 <sup>j</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	16.32±0.16 <sup>c</sup>	13.59±0.60 <sup>h</sup>	0.13±0.00 <sup>g</sup>
MA	2.0	25	9.83±0.41 <sup>h</sup>	10.66±0.10 <sup>i</sup>	0.12±0.01 <sup>h</sup>
MA	2.5	25	13.83±0.21 <sup>c</sup>	19.92±0.42 <sup>cd</sup>	0.18±0.00 <sup>d</sup>
MA	3.0	25	13.63±0.17 <sup>c</sup>	19.17±0.22 <sup>d</sup>	0.18±0.00 <sup>d</sup>
MA	2.0	30	13.52±0.57 <sup>c</sup>	20.21±0.11 <sup>c</sup>	0.19±0.00 <sup>c</sup>
แป้งดิบ	-	-	0.93±0.04 <sup>i</sup>	2.64±0.14 <sup>k</sup>	0.04±0.00 <sup>j</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	9.77±0.40 <sup>h</sup>	21.33±0.77 <sup>b</sup>	0.21±0.00 <sup>b</sup>
LA	3.0	25	3.31±0.13 <sup>i</sup>	4.45±0.16 <sup>j</sup>	0.06±0.00 <sup>i</sup>
LA	4.0	25	12.50±0.33 <sup>f</sup>	16.52±0.46 <sup>f</sup>	0.16±0.00 <sup>ef</sup>
LA	5.0	25	n.d.	n.d.	n.d.
LA	3.0	30	24.02±1.86 <sup>b</sup>	22.19±1.41 <sup>a</sup>	0.19±0.01 <sup>cd</sup>
แป้งดิบ	-	-	0.51±0.02 <sup>j</sup>	2.65±0.06 <sup>k</sup>	0.04±0.00 <sup>j</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	34.06±0.81 <sup>a</sup>	20.45±0.68 <sup>c</sup>	0.27±0.02 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างควบคุมที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการแตกตัว

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

### 2.3 องค์ประกอบของแอมิโลส

ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS แสดงดังตารางที่ 8 มีค่าระหว่างร้อยละ 41.29-42.41, 25.02-26.07 และ 9.21-10.28 ตามลำดับ แป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 39.13, 24.02 และ 9.51 ตามลำดับ ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าสูงกว่าแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกันเล็กน้อย Jane *et al.* (1986); Chen and Jane (1994a) ได้เตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง พบว่า แอมิโลสภายในเมล็ดแป้งจะถูกชะออกเล็กน้อย และ Singh and Singh (2003) ได้รายงานในทำนองเดียวกัน เมื่อเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งมันฝรั่ง ขณะที่ Bello-Pérez *et al.* (2000); Kaur *et al.* (2010) ได้เตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งกล้วย และแป้งสาธู ตามลำดับ พบว่า ปริมาณแอมิโลสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่กลูแคนของแอมิโลเพกตินอาจเกิดการแตกหักระหว่างกระบวนการเตรียม ดังนั้น ในการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสตามวิธีของ Juliano (1971) นอกจากจะเป็นการวัดแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบภายในเมล็ดแป้งแล้ว สายโซ่กลูแคนที่เกิดจากการแตกหักของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินก็สามารถเกิดการพันเกลียวกับโมเลกุลของไอโอดีนและเกิดสีได้เช่นกัน

Chen and Jane (1994b) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันในแป้งละลายน้ำเย็นที่เตรียมได้จากวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง พบว่า ปริมาณไขมันในแป้งละลายน้ำเย็นมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 20-40 เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ Bello-Pérez *et al.*, (2000) ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและโปรตีนในแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งกล้วยที่เตรียมโดยวิธีเดียวกัน พบว่า ปริมาณไขมันและโปรตีนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ดังนั้น การแขวนลอยแป้งในเอทานอลนอกจากจะช่วยกำจัดโปรตีนในข้าว (Tecson *et al.*, 1971) แล้ว ยังช่วยขจัดไขมัน (Chiou *et al.*, 2002) ได้ด้วย เป็นผลให้แอมิโลสที่เคยพันเกลียวกับโปรตีนหรือไขมันซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Galliard and Bowler, 1987) มีความเป็นอิสระมากขึ้น และเกิดการพันเกลียวกับโมเลกุลของไอโอดีนได้ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น ปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีการทำปฏิกิริยากับไอโอดีนนี้จึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 8 ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน

แป้ง <sup>1</sup>	สภาวะการเตรียม		ร้อยละปริมาณแอมิโลส
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
HA	1.0	25	41.29±0.18 <sup>b</sup>
HA	2.0	25	41.74±0.11 <sup>b</sup>
HA	3.0	25	42.41±0.17 <sup>a</sup>
แป้งดิบ	-	-	39.13±0.13 <sup>c</sup>
MA	2.0	25	25.02±0.03 <sup>e</sup>
MA	2.5	25	25.05±0.41 <sup>e</sup>
MA	3.0	25	25.25±0.14 <sup>e</sup>
MA	2.0	30	26.07±0.33 <sup>d</sup>
แป้งดิบ	-	-	24.02±0.24 <sup>f</sup>
LA	3.0	25	9.51±0.03 <sup>h</sup>
LA	4.0	25	9.75±0.27 <sup>gh</sup>
LA	5.0	25	n.d.
LA	3.0	30	10.28±0.02 <sup>g</sup>
แป้งดิบ	-	-	9.21±0.85 <sup>h</sup>

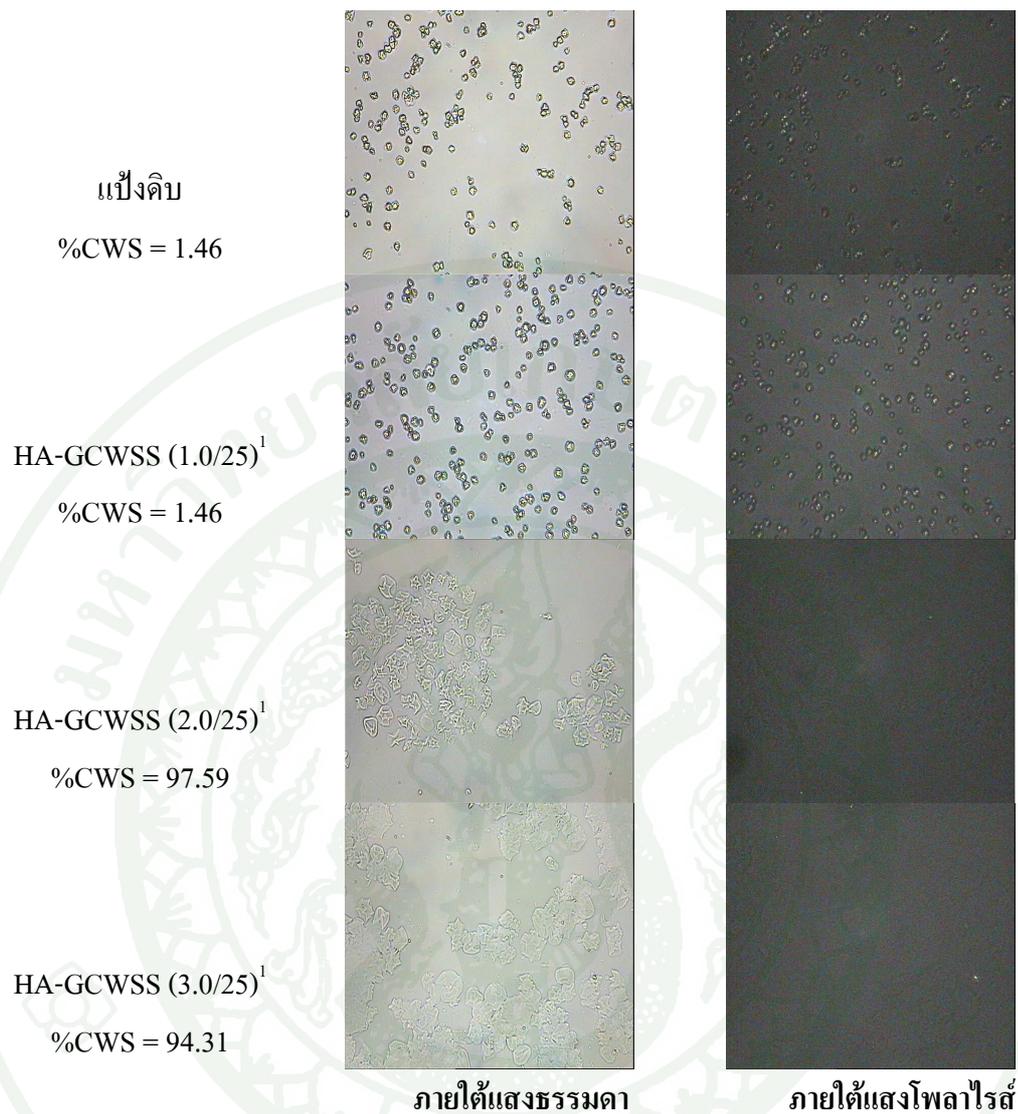
หมายเหตุ: n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการแตกตัว

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

## 2.4 ลักษณะรูปร่าง การเกิดกากบาท (maltese cross) และ birefringence ของเม็ดแป้ง

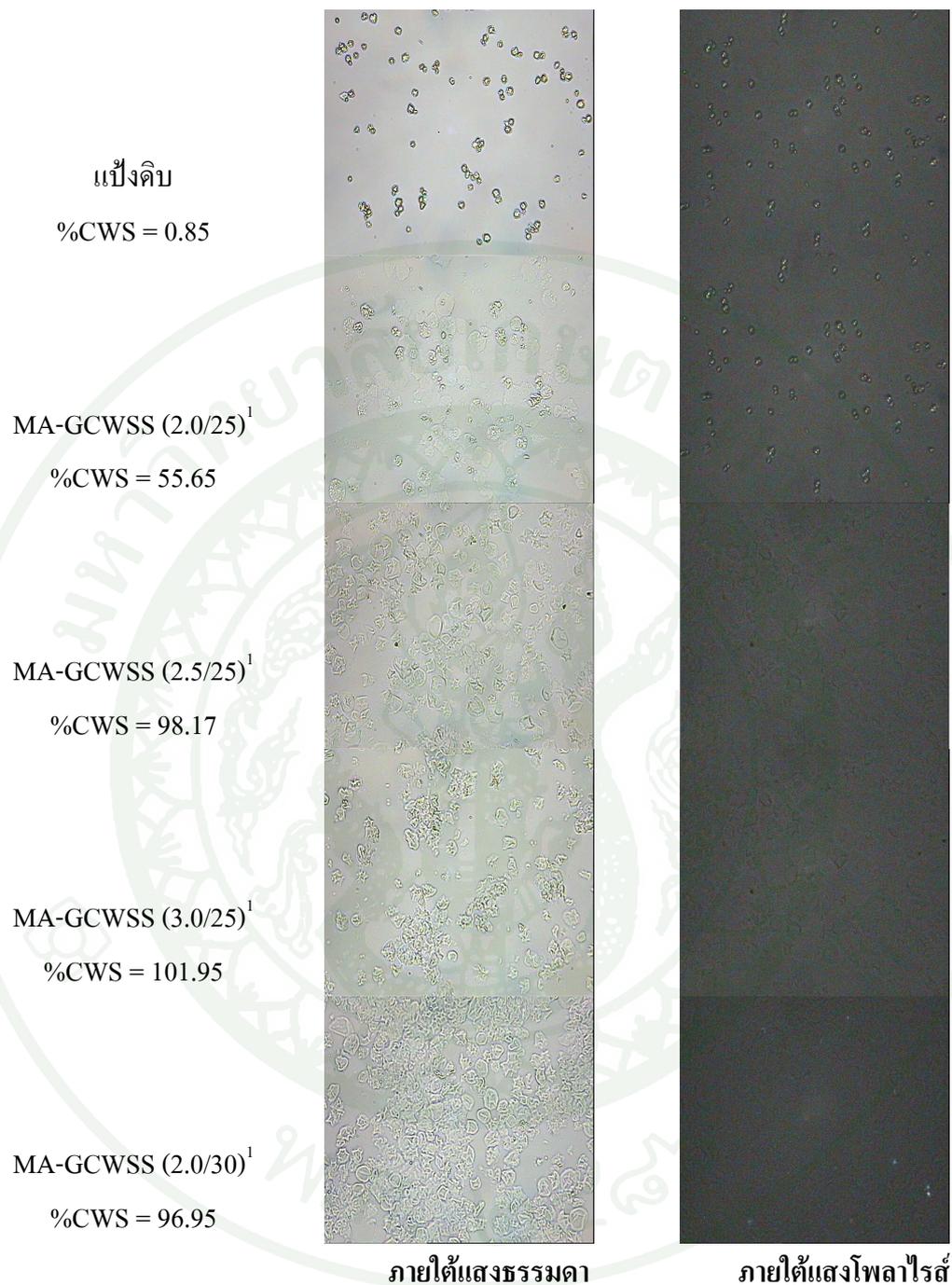
เมื่อนำแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS สูงไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดาที่กำลังขยาย 50 เท่า แสดงดังภาพที่ 18, 19 และ 20 ตามลำดับ พบว่า ในขณะที่เตรียมตัวอย่างเม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำได้ทันทีที่มีขนาดใหญ่กว่าแป้งดิบ เมื่อนำไปวิเคราะห์ภายใต้แสงโพลาไรส์ เม็ดแป้งจะสูญเสียลักษณะกากบาท (maltese cross) และไม่ปรากฏลักษณะ birefringence แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง (Jane *et al.*, 1986) ในขณะที่ แป้ง HA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS ต่ำ เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ จะมีขนาดและลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งที่ไม่แตกต่างจากแป้งดิบ และเมื่อวิเคราะห์ภายใต้แสงโพลาไรส์จะยังคงปรากฏลักษณะ birefringence

จากภาพที่ 20 มีข้อสังเกตว่า เมื่อเตรียมแป้ง LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่มีค่า %CWS เท่ากับ 90.36 และ 95.64 ตามลำดับ พบว่า เม็ดแป้งมีลักษณะการพองตัวในระดับที่น้อยกว่าแป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS อาจเป็นเพราะสภาวะการเตรียมที่มีน้ำในระบบอย่างจำกัด และมีแอลกอฮอล์ที่ป้องกันการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้ลักษณะเม็ดแป้งมีการพองตัวที่จำกัด ดังนั้น เมื่อวิเคราะห์เม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ จึงพบว่าในขณะที่เตรียมตัวอย่าง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำแต่มีขนาดใหญ่ขึ้นไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงขนาดของแป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS



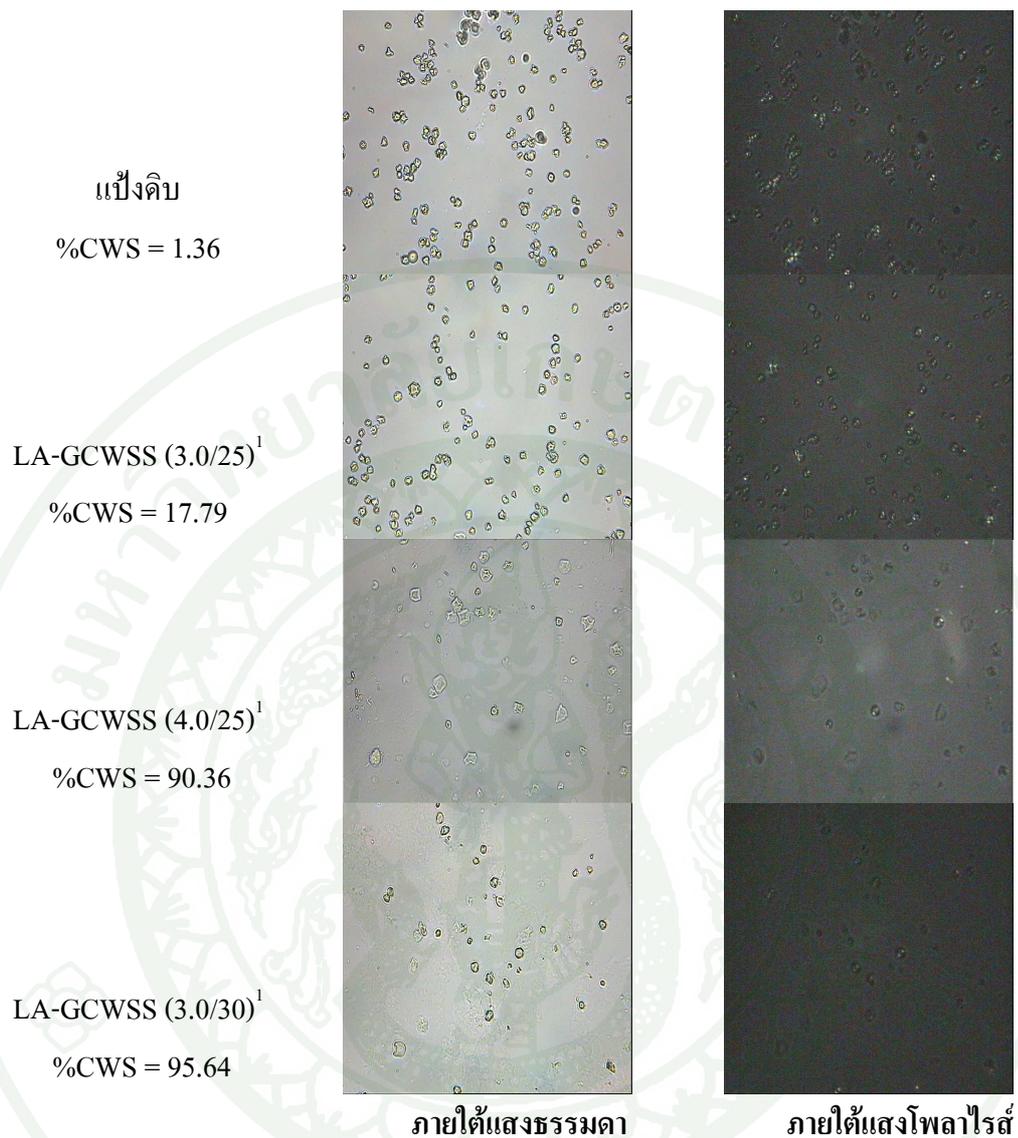
ภาพที่ 18 ภาพเม็ดแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้งแสงธรรมดา และแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น



ภาพที่ 19 ภาพเม็คแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้งแสงธรรมดา และแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น



ภาพที่ 20 ภาพเม็ดแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดาและแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้งและอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น

## 2.5 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง

ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 21, 22 และ 23 ตามลำดับ เม็ดแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS สูง ๆ จะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน มีรอยเว้าแหว่ง รูปร่างเหี่ยว และบิดเบี้ยว ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Chen and Jane (1994a); Singh and Singh (2003); Kaur *et al.* (2010) ขณะที่แป้ง HA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS ต่ำ เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ พบว่า มีขนาดและลักษณะรูปร่างไม่แตกต่างจากแป้งดิบที่มีลักษณะหลายเหลี่ยม

ลักษณะของเม็ดแป้งละลายน้ำเย็นที่เกิดการหลอมเชื่อมติดกันนี้อาจมีผลต่อการล้างเกลื่อที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการหยุดปฏิกิริยา จึงทำให้มีเกลื่อหลงเหลืออยู่ในเม็ดแป้ง (Chen and Jane, 1994) เป็นผลให้ปริมาณเถ้าของแป้งละลายน้ำเย็นมีค่าสูงกว่าแป้งดิบ (ตารางที่ 6) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเตรียม LA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ซึ่งให้ค่า %CWS สูงคิดเป็นร้อยละ 90.36 และ 95.64 ตามลำดับ พบว่า ขณะที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ที่ทำปฏิกิริยากับแป้งใกล้เคียงเข้าสู่ปริมาณที่กำหนด สารละลายแป้งจะค่อย ๆ จับตัวเกาะกลุ่มกัน ไม่เกิดลักษณะเป็นน้ำแป้งที่มีเนื้อเดียวดังที่พบในการเตรียม HA-GCWSS และ MA-GCWSS เมื่อหยุดปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลาร์ในสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 แป้งจะกลับมามีลักษณะเป็นสารละลายเนื้อเดียวอีกครั้ง แต่เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการล้างเกลื่อโดยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 85 ซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าขั้นตอนในการทำปฏิกิริยา พบว่า แป้งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ซึ่งอาจทำให้เกลื่อที่เกิดขึ้นภายในเม็ดแป้งไม่สามารถล้างออกอย่างทั่วถึง เป็นผลให้ปริมาณเถ้ามีค่าสูงนั่นเอง

แป้งดิบ

%CWS = 1.46

HA-GCWSS (1.0/25)<sup>1</sup>

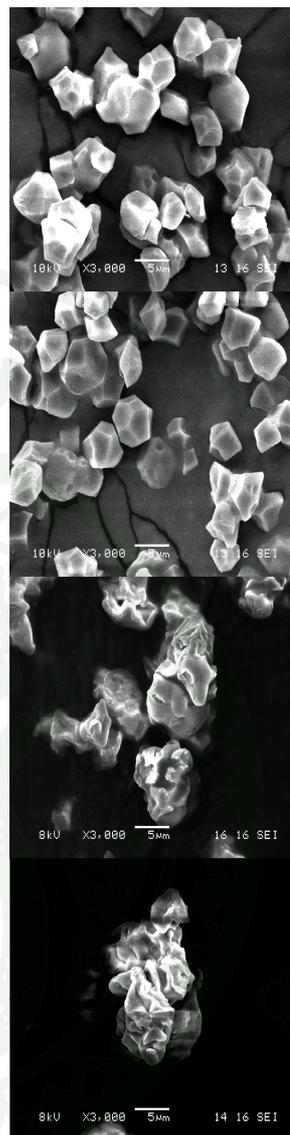
%CWS = 1.46

HA-GCWSS (2.0/25)<sup>1</sup>

%CWS = 97.59

HA-GCWSS (3.0/25)<sup>1</sup>

%CWS = 94.31



ภาพที่ 21 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น

แป้งดิบ

%CWS = 0.85

MA-GCWSS (2.0/25)<sup>1</sup>

%CWS = 55.65

MA-GCWSS (2.5/25)<sup>1</sup>

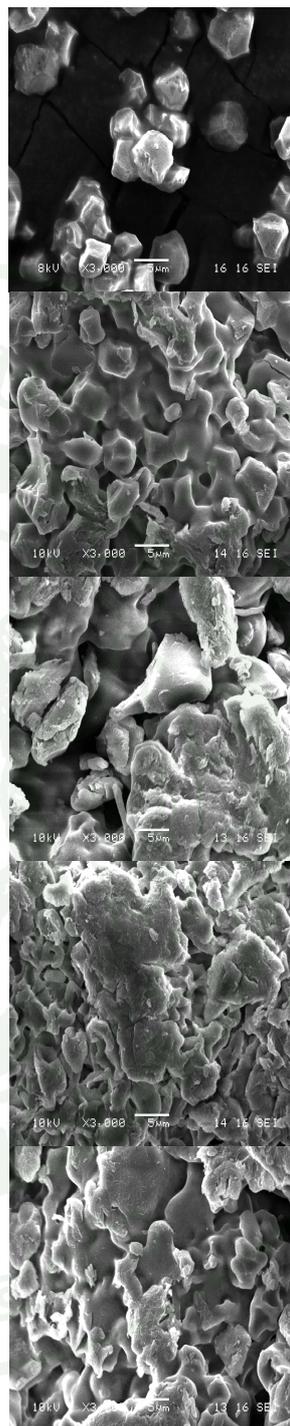
%CWS = 98.17

MA-GCWSS (3.0/25)<sup>1</sup>

%CWS = 101.95

MA-GCWSS (2.0/30)<sup>1</sup>

%CWS = 96.95



ภาพที่ 22 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น

แป้งดิบ

%CWS = 1.36

LA-GCWSS (3.0/25)<sup>1</sup>

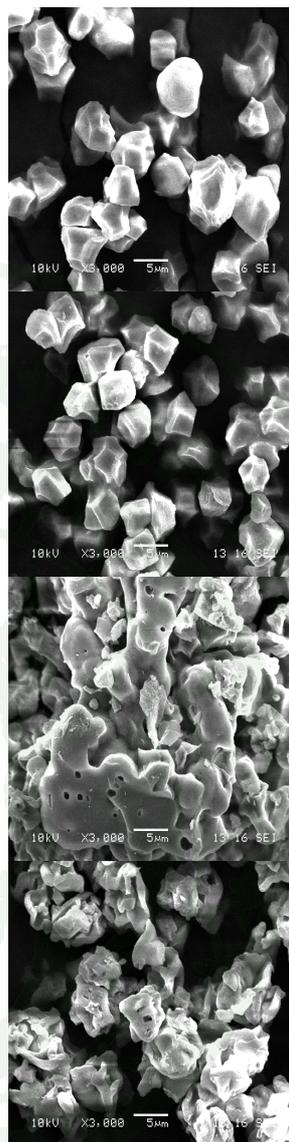
%CWS = 17.79

LA-GCWSS (4.0/25)<sup>1</sup>

%CWS = 90.36

LA-GCWSS (3.0/30)<sup>1</sup>

%CWS = 95.64



ภาพที่ 23 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วย SEM กำลังขยาย 3,000 เท่า

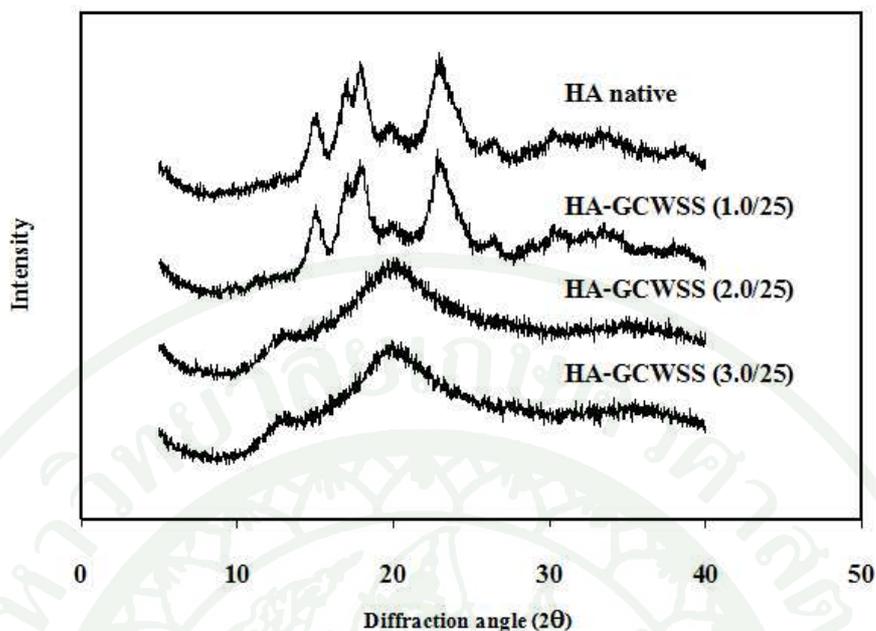
หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น

## 2.6 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS แสดงดังภาพที่ 24, 25 และ 26 ตามลำดับ รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้งดิบจากแป้ง HA, MA และ LA และแป้ง HA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS ต่ำ เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ จะปรากฏจุดพิคที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 15 องศา จำนวน 1 จุด ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 17-18 องศา จำนวน 2 จุดเชื่อมต่อกัน ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 20 องศา จำนวน 1 จุด และตำแหน่ง 20 เท่ากับ 23 จำนวน 1 จุด ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ A ที่มีการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่แอมิโลเพกตินสายสั้นแบบหนาแน่นมาก และเป็นแบบที่พบบ่อยในแป้งกลุ่มธัญชาติ (Buléon *et al.*, 1998)

แป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS ที่มีค่า %CWS สูง จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งเป็นลักษณะของสายโซ่เกลียวเดี่ยว โดยปรากฏพิคที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 13 และ 20 ดังการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Jane *et al.* (1986); Rajagopalan and Seib (1992b); Jane and Chen (1994b); Kaur *et al.* (2010) ขณะที่รูปแบบโครงสร้างผลึกของแป้ง LA-GCWSS มีลักษณะแบบอสัณฐาน โดย Jane and Chen (1994b) ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว พบว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐานเช่นเดียวกัน French and Murphy (1977) ได้รายงานว่า แอมิโลสเกลียวเดี่ยว และแป้งที่มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐานสามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Jane *et al.* (1986) ได้ศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลีทางการค้า ที่เตรียมโดยให้ความร้อนสูงในเอทานอล และภายใต้ความดัน พบว่า เมื่อโครงสร้างเกลียวคู่ถูกแยกออกด้วยความร้อน แอมิโลเพกตินตลอดจนแอมิโลส จะเกิดการสารประกอบเชิงซ้อน (V-complex) กับแอลกอฮอล์ อย่างไรก็ตาม การทำแห้งแป้งละลายน้ำเย็น จะทำให้เกิดการจับตัวของโครงสร้างผลึกแบบ V ของสายโซ่เดี่ยวที่ปราศจากน้ำกับช่องว่างด้วย (Rajagopalan and Seib, 1992b)



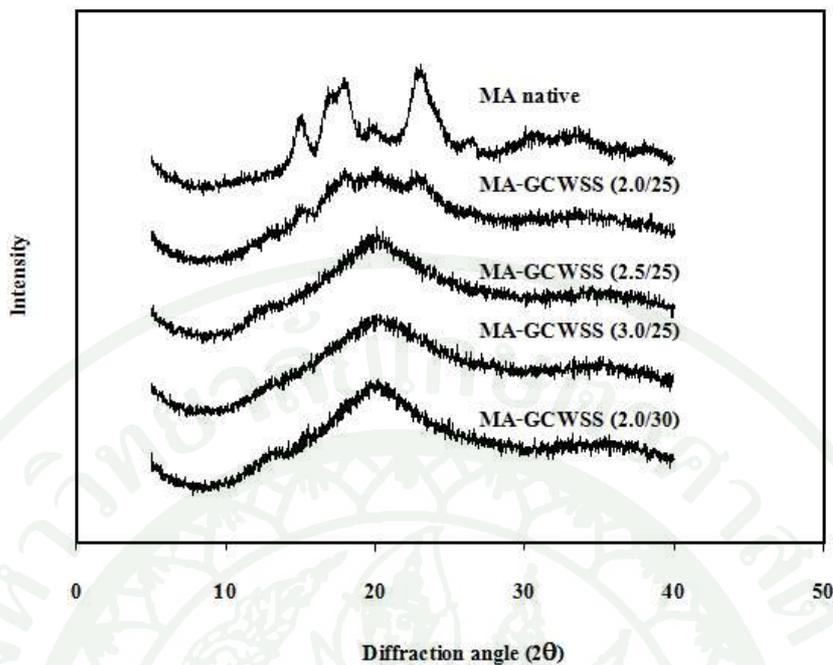
ภาพที่ 24 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer

หมายเหตุ: HA native คือ แป้งดิบจากแป้ง HA

HA-GCWSS (1.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 25 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer

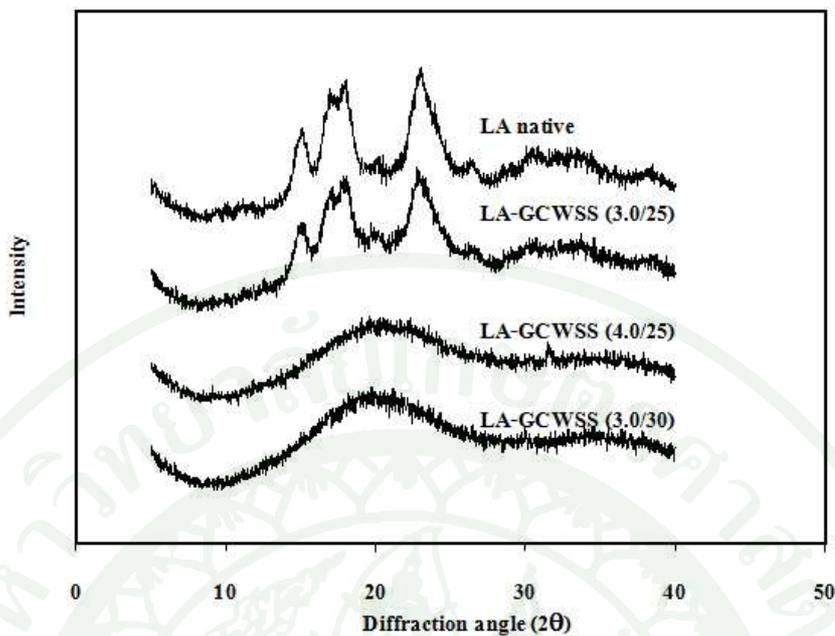
หมายเหตุ: MA native คือ แป้งดิบจากแป้ง MA

MA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.5/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.0/30) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 26 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer

หมายเหตุ: LA native คือ แป้งดิบจากแป้ง LA

LA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (4.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

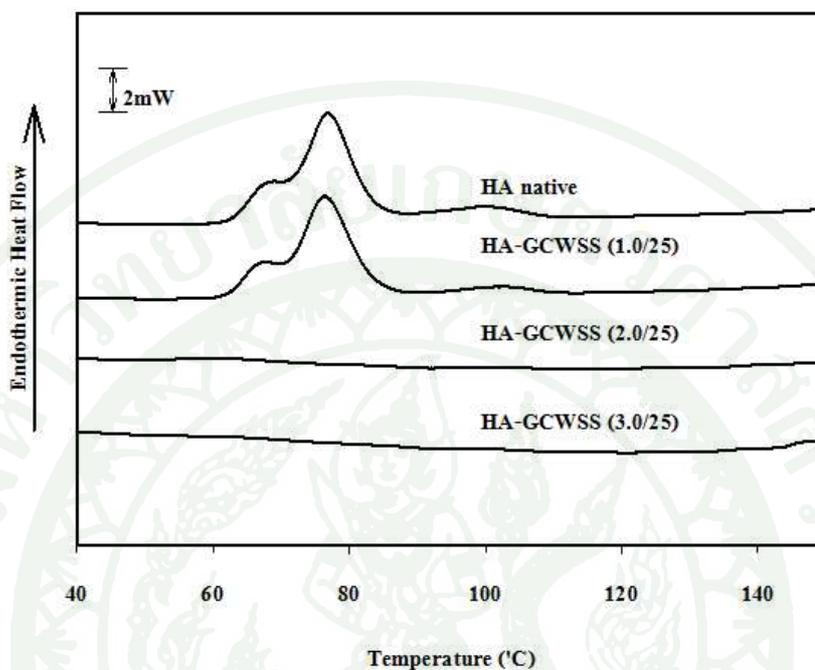
LA-GCWSS (3.0/30) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

## 2.7 คุณลักษณะทางอุณหพลศาสตร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งดิบ และ แป้งละลายน้ำเย็น แสดงดังภาพที่ 27, 28 และ 29 ตามลำดับ และตารางที่ 9 แป้งดิบจากแป้ง HA และ MA ปรากฏพีคที่ใช้ในการดูดพลังงาน (endothermic peak) 2 ตำแหน่ง พีคตำแหน่งแรกมี อุณหภูมิระหว่าง 60-85 องศาเซลเซียส เกิดจากการเจลลาติโนเซชันของแป้ง เป็นการทำลายพันธะ ไฮโดรเจนในโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่พบในส่วนผลึกของโมเลกุลแอมิโลเพกติน โดยมีอุณหภูมิ เริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_0$ ) ของแป้ง HA, MA และ LA เท่ากับ 70.27, 63.66 และ 59.36 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_p$ ) 76.83, 70.00 และ 67.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_c$ ) 83.46, 76.84 และ 77.63 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta H$ ) 16.55, 15.47 และ 17.70 จูลต่อกรัม ตามลำดับ พีคตำแหน่งที่ 2 ปรากฏในแป้ง HA และ MA เท่านั้น มีอุณหภูมิ ระหว่าง 90-110 องศาเซลเซียส เกิดจากการหลอมละลายของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับ ไขมัน (amylose-lipid complex) ซึ่งมีความเสถียรหรือแข็งแรงกว่าโครงสร้างที่เป็นระเบียบของ แอมิโลเพกติน โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_0$ ) ของแป้ง HA และ MA เท่ากับ 91.62 และ 90.15 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta H$ ) 1.39 และ 1.34 จูลต่อกรัม ตามลำดับ หากพิจารณาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ พบว่า แป้ง HA จะมี อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_0$ ) สูงกว่าแป้ง MA และ LA ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเป็น ผลจากโครงสร้างเม็ดแป้งที่โมเลกุลของแอมิโลสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ ไขมัน ได้ (Kugimiya *et al.*, 1980) ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเกิดเจลลาติโนเซชันที่อุณหภูมิสูง

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งละลายน้ำเย็น พบว่า แป้ง HA-GCWSS ที่มีค่า %CWS มากกว่า 90 มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_0$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด ของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_p$ ) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_c$ ) และพลังงาน ที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta H$ ) ของพีคตำแหน่งที่ 1 ในการเกิดเจลลาติโนเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ จากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน ขณะที่ แป้ง MA-GCWSS และ LA-GCWSS ไม่ปรากฏพีคที่ใช้ในการดูด พลังงาน ทั้งนี้ แสดงให้เห็นว่า เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน โดยมีโครงสร้างที่เป็น ระเบียบลดลง ส่งผลให้มีอุณหภูมิในการเจลลาติโนเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ (Jane *et al.*, 1986; Chen and Jane, 1994b) วิธีการตัดแปรแป้งด้วยการแขวนลอยในแอลกอฮอล์ร่วมกับค้างจะทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง (Chen and Jane, 1994a และ Singh and Singh, 2003)



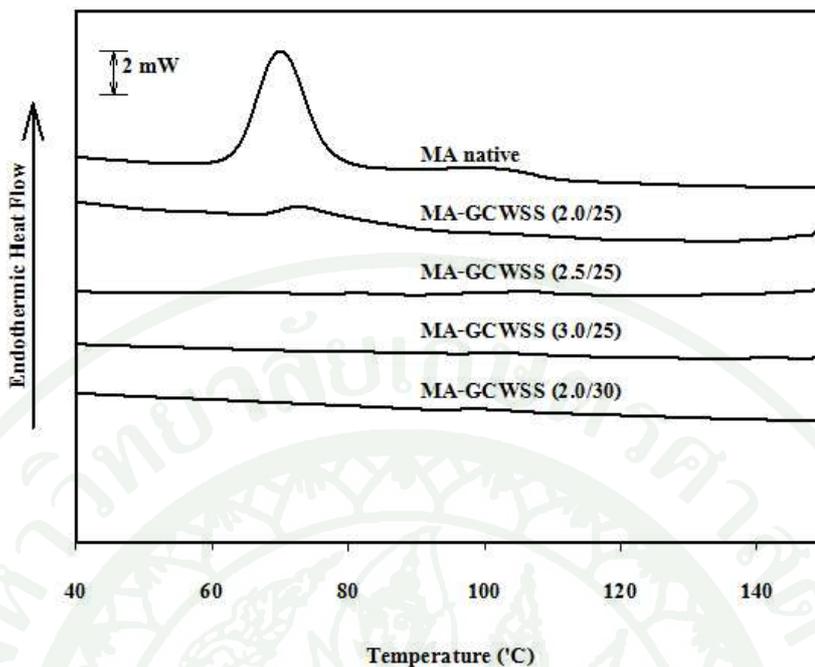
ภาพที่ 27 การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: HA native คือ แป้งดิบจากแป้ง HA

HA-GCWSS (1.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 28 การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

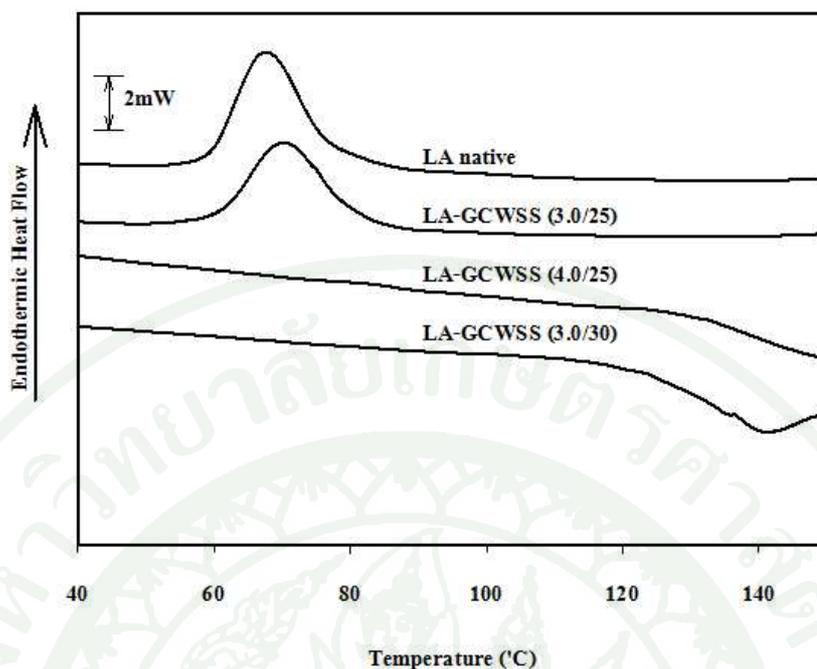
หมายเหตุ: MA native คือ แป้งดิบจากแป้ง MA

MA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.5/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.0/30) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 29 การเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: LA native คือ แป้งดิบจากแป้ง LA

LA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (4.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (3.0/30) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 9 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเจลาติโนเซชันของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

แป้ง	สภาวะในการเตรียม		พีคที่หนึ่ง				พีคที่สอง			
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	To (องศาเซลเซียส)	Tp (องศาเซลเซียส)	Tc (องศาเซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	To (องศาเซลเซียส)	Tp (องศาเซลเซียส)	Tc (องศาเซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)
HA	1.0	25	69.97±.18 <sup>a</sup>	76.42±0.12 <sup>a</sup>	83.59±0.23 <sup>b</sup>	16.16±0.09 <sup>bc</sup>	93.24±1.63 <sup>ab</sup>	102.25±1.06 <sup>b</sup>	109.99±0.61 <sup>ns</sup>	1.02±0.07 <sup>b</sup>
HA	2.0	25	53.03±0.46 <sup>g</sup>	61.75±0.59 <sup>c</sup>	74.36±0.29 <sup>f</sup>	0.85±0.14 <sup>f</sup>	95.24±0.84 <sup>a</sup>	102.59±1.29 <sup>b</sup>	106.39±2.59 <sup>ns</sup>	0.20±0.02 <sup>c</sup>
HA	3.0	25	52.84±0.29 <sup>g</sup>	62.17±0.71 <sup>c</sup>	89.32±0.34 <sup>a</sup>	0.76±0.27 <sup>f</sup>	93.94±3.67 <sup>ab</sup>	100.75±1.30 <sup>b</sup>	106.07±0.12 <sup>ns</sup>	0.15±0.06 <sup>c</sup>
แป้งดิบ	-	-	70.27±0.57 <sup>a</sup>	76.83±0.00 <sup>a</sup>	83.46±0.01 <sup>bc</sup>	16.55±0.84 <sup>b</sup>	91.62±2.45 <sup>ab</sup>	100.50±1.41 <sup>b</sup>	108.33±0.03 <sup>ns</sup>	1.39±0.10 <sup>a</sup>
MA	2.0	25	66.88±0.66 <sup>b</sup>	72.92±0.12 <sup>b</sup>	82.40±1.00 <sup>c</sup>	2.38±0.58 <sup>c</sup>	95.46±0.37 <sup>a</sup>	106.00±2.12 <sup>a</sup>	111.41±2.78 <sup>ns</sup>	0.23±0.12 <sup>c</sup>
MA	2.5	25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MA	3.0	25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MA	2.0	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
แป้งดิบ	-	-	63.66±0.08 <sup>c</sup>	70.00±0.24 <sup>c</sup>	76.84±0.35 <sup>c</sup>	15.47±0.22 <sup>cd</sup>	90.15±0.77 <sup>b</sup>	101.67±0.00 <sup>b</sup>	106.99±4.12 <sup>ns</sup>	1.34±0.06 <sup>a</sup>
LA	3.0	25	60.55±0.23 <sup>d</sup>	70.17±0.23 <sup>c</sup>	80.51±0.47 <sup>d</sup>	14.47±0.12 <sup>d</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LA	4.0	25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LA	3.0	25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
แป้งดิบ	-	-	59.36±0.09 <sup>f</sup>	67.67±0.00 <sup>d</sup>	77.63±0.35 <sup>c</sup>	17.70±0.72 <sup>a</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

หมายเหตุ: n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากไม่ปรากฏพีค, ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติ,

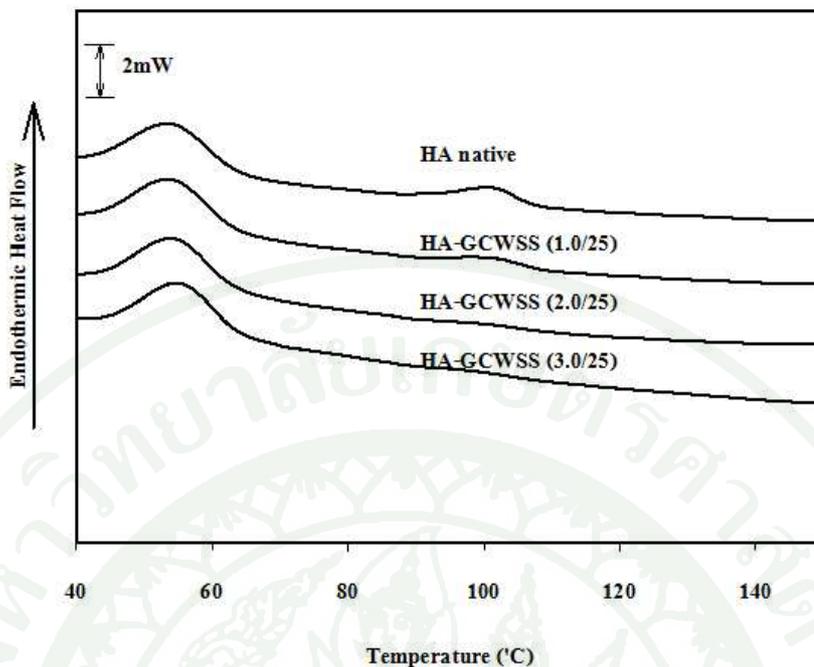
ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

To (Onset temperature) อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติโนเซชัน, Tp (Peak temperature) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลาติโนเซชัน,

Tc (Conclusion temperature) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลาติโนเซชัน และ  $\Delta H$  (Enthalpy) ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชัน

ผลจากการนำแป้ง HA, MA, LA, HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรดชันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 30, 31 และ 32 ตามลำดับ และตารางที่ 10 พบว่า แป้งแป้งรีโทรเกรด HA และ MA ยังคงปรากฏพีคที่ใช้ในการดูดพลังงาน (endothermic) 2 ตำแหน่ง ขณะที่ แป้งรีโทรเกรด LA ไม่ปรากฏพีคตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน โดยพีคตำแหน่งที่ 1 ของ DSC thermogram ของแป้งละลายน้ำเย็นรีโทรเกรด ซึ่งเกิดจากการหลอมผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ แป้งรีโทรเกรดของแป้งข้าวทั้ง 3 ชนิด มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก ( $T_o$ ) (42.35, 46.36 และ 44.76 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ต่ำกว่าพีคตำแหน่งที่ 1 ของการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งดิบ (70.27, 63.66 และ 59.36 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เป็นผลให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก ( $T_p$ ) (53.90, 54.83 และ 52.72 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการหลอมผลึก ( $T_c$ ) (63.71, 62.10 และ 59.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) และพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ( $\Delta H$ ) (7.56, 5.32 และ 1.45 จูลต่อกรัม ตามลำดับ) มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งดิบด้วย ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างที่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของแป้งรีโทรเกรดนี้ มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกน้อยกว่าแป้งดิบ และโครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างของแอมิโลส โดยสามารถเกิดการเปลี่ยนสถานะได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่านั่นเอง (Vandeputte et al., 2003)

แป้งรีโทรเกรด HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก ( $T_c$ ) และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก ( $T_p$ ) และพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ( $\Delta H$ ) ของแป้งรีโทรเกรดมีค่าระหว่าง 7.28-7.52, 5.61-6.99 และ 0.84-2.08 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับแป้งรีโทรเกรดของแป้งดิบ และร้อยละการเกิดรีโทรเกรดชัน (%R) จากพีคตำแหน่งที่ 1 มีค่าระหว่างร้อยละ 43.99-45.44, 36.26-45.18 และ 4.75-11.75 ตามลำดับ ค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรดชันจะบ่งบอกถึงแนวโน้มความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกตินของแป้งละลายน้ำเย็นเปรียบเทียบกับแป้งดิบ เมื่อพิจารณาแป้งละลายน้ำเย็นที่ให้ค่า %CWS สูงกว่า 90 พบว่า แป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกตินใกล้เคียงแป้งดิบ ขณะที่พีคตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน จะพบเฉพาะแป้งรีโทรเกรด HA-GCWSS และ MA-GCWSS เท่านั้น



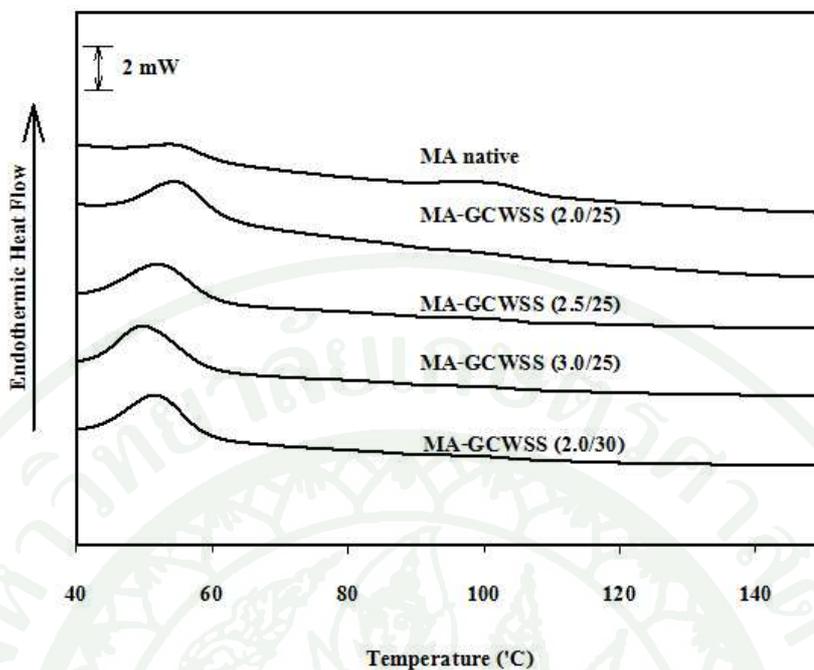
ภาพที่ 30 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: HA native คือ แป้งดิบจากแป้ง HA

HA-GCWSS (1.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 31 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

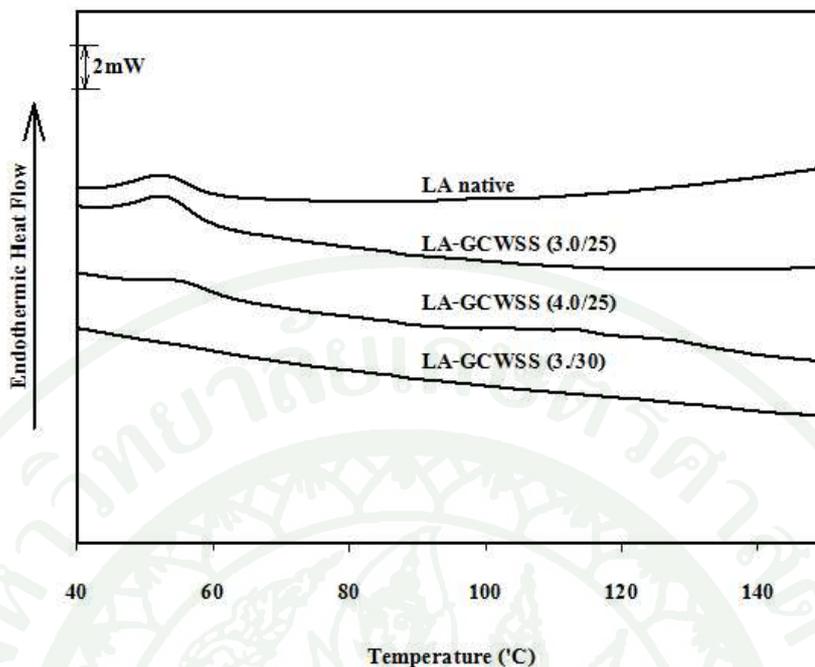
หมายเหตุ: MA native คือ แป้งดิบจากแป้ง MA

MA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.5/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.0/30) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 32 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: LA native คือ แป้งดิบจากแป้ง LA

LA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (4.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (3.0/30) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 10 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งรีโทรเกรด HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

แป้ง	สภาวะในการเตรียม	อุณหภูมิจุดหลอม (องศาเซลเซียส)	พีคที่หนึ่ง				พีคที่สอง				
			To (องศาเซลเซียส)	Tp (องศาเซลเซียส)	Tc (องศาเซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	To (องศาเซลเซียส)	Tp (องศาเซลเซียส)	Tc (องศาเซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	
HA	1.0	25	43.26±0.09 <sup>bc</sup>	53.92±0.12 <sup>ab</sup>	63.56±0.02 <sup>ab</sup>	7.28±0.19 <sup>ab</sup>	43.99	88.99±1.87 <sup>bc</sup>	101.25±0.35 <sup>a</sup>	108.31±0.18 <sup>a</sup>	0.95±0.02 <sup>b</sup>
HA	2.0	25	43.63±0.26 <sup>bc</sup>	54.25±0.11 <sup>ab</sup>	63.61±0.04 <sup>ab</sup>	7.38±0.13 <sup>ab</sup>	44.59	88.25±0.11 <sup>c</sup>	97.75±0.35 <sup>b</sup>	105.22±0.88 <sup>b</sup>	0.16±0.07 <sup>c</sup>
HA	3.0	25	44.76±0.26 <sup>ab</sup>	55.25±0.35 <sup>a</sup>	64.39±0.37 <sup>a</sup>	7.52±0.44 <sup>a</sup>	45.44	88.34±0.94 <sup>c</sup>	98.50±0.47 <sup>ab</sup>	105.68±1.53 <sup>ab</sup>	0.16±0.00 <sup>c</sup>
แป้งรีโทรเกรด	-	-	42.35±0.26 <sup>c</sup>	53.90±0.15 <sup>ab</sup>	63.71±0.23 <sup>ab</sup>	7.56±0.05 <sup>a</sup>	45.68	90.31±2.21 <sup>abc</sup>	100.00±1.17 <sup>ab</sup>	107.26±0.37 <sup>ab</sup>	1.83±0.03 <sup>a</sup>
MA	2.0	25	46.30±0.36 <sup>a</sup>	54.67±0.00 <sup>a</sup>	62.17±1.68 <sup>bc</sup>	5.61±0.27 <sup>d</sup>	36.26	93.17±1.77 <sup>a</sup>	98.59±0.59 <sup>ab</sup>	104.71±1.29 <sup>b</sup>	0.11±0.03 <sup>c</sup>
MA	2.5	25	44.51±2.67 <sup>abc</sup>	53.59±1.53 <sup>ab</sup>	60.99±0.29 <sup>cde</sup>	6.61±3.38 <sup>c</sup>	42.73	88.00±1.17 <sup>c</sup>	99.83±1.41 <sup>ab</sup>	107.20±2.43 <sup>ab</sup>	0.17±0.09 <sup>c</sup>
MA	3.0	25	42.75±0.08 <sup>bc</sup>	50.59±2.00 <sup>d</sup>	58.57±2.18 <sup>f</sup>	6.99±0.45 <sup>bc</sup>	45.18	89.17±1.18 <sup>bc</sup>	99.59±2.71 <sup>ab</sup>	105.14±0.21 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>c</sup>
MA	2.0	30	42.93±0.06 <sup>bc</sup>	51.75±0.11 <sup>cd</sup>	59.32±0.26 <sup>ef</sup>	6.66±0.17 <sup>c</sup>	43.05	88.34±1.18 <sup>c</sup>	99.33±1.41 <sup>ab</sup>	105.01±0.11 <sup>b</sup>	0.18±0.00 <sup>c</sup>
แป้งรีโทรเกรด	-	-	46.36±0.38 <sup>a</sup>	54.83±0.71 <sup>a</sup>	62.10±1.57 <sup>bc</sup>	5.32±0.04 <sup>d</sup>	34.40	91.52±0.84 <sup>ab</sup>	98.67±0.47 <sup>ab</sup>	105.18±1.51 <sup>b</sup>	0.14±0.04 <sup>c</sup>
LA	3.0	25	44.89±0.19 <sup>ab</sup>	52.92±0.12 <sup>bc</sup>	59.91±0.19 <sup>def</sup>	2.08±0.18 <sup>f</sup>	11.75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LA	4.0	25	44.90±2.35 <sup>ab</sup>	54.92±0.35 <sup>a</sup>	61.45±0.36 <sup>bcd</sup>	0.84±0.08 <sup>h</sup>	4.75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LA	3.0	25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
แป้งรีโทรเกรด	-	-	44.76±0.47 <sup>ab</sup>	52.75±0.11 <sup>bc</sup>	59.58±0.03 <sup>def</sup>	1.45±0.26 <sup>g</sup>	8.19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

หมายเหตุ: n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากไม่ปรากฏพีค

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

To (Onset temperature) อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน, Tp (Peak temperature) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน, Tc (Conclusion temperature) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน และ  $\Delta H$  (Enthalpy) ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน  
 %R (%Retrogradation) ร้อยละของการเกิดรีโทรเกรดชัน มีค่าเท่ากับ  $(\Delta H_{\text{แป้งรีโทรเกรด}} / \Delta H_{\text{แป้งดิบในการเกิดเจลลาติโนเซชัน}}) \times 100$

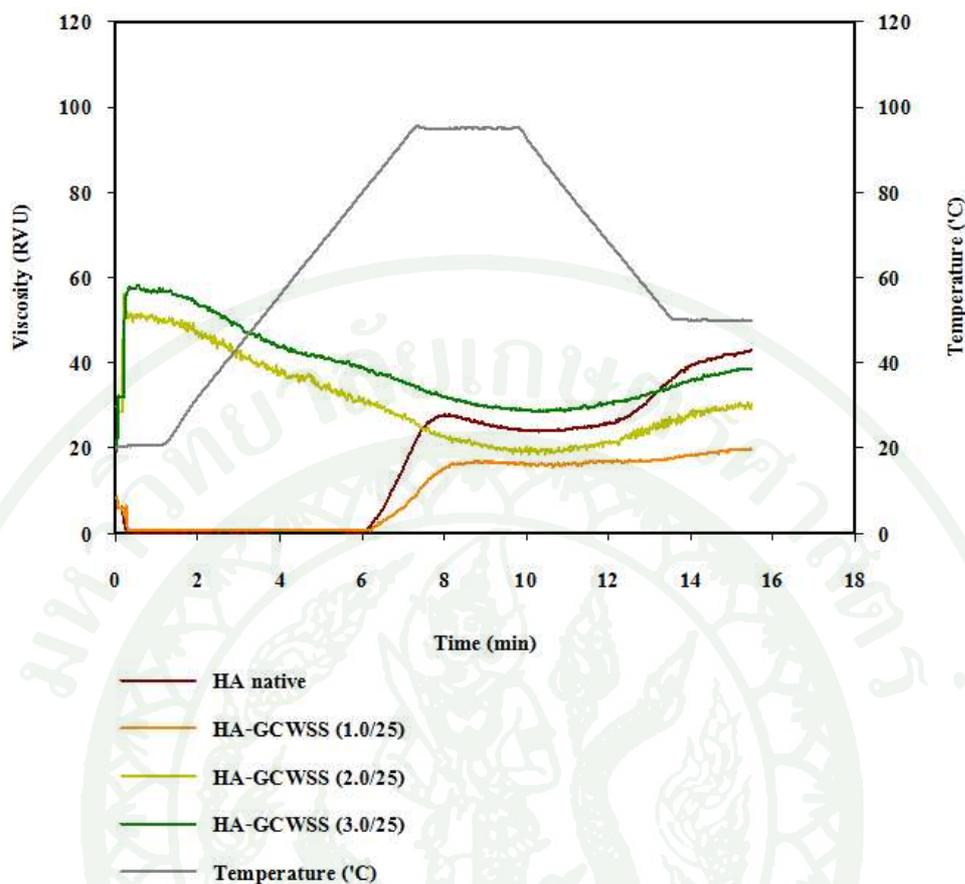
## 2.8 ลักษณะความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของสารละลายแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS แสดงดังภาพที่ 33, 34 และ 35 ตามลำดับ และตารางที่ 11 ตามลำดับ แป้ง HA, MA และ LA มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (อุณหภูมิที่เม็ดแป้งเริ่มเกิดการพองตัว) เท่ากับ 88.18, 95.48 และ 71.25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความหนืด เท่ากับ 8.03, 11.37 และ 6.99 นาที ตามลำดับ ความหนืดสูงสุด (ความหนืดของเม็ดแป้งขณะพองตัวเต็มที่) เท่ากับ 27.71, 36.17 และ 89.36 RVU ตามลำดับ ความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เท่ากับ 24.25, 32.83 และ 73.33 RVU ตามลำดับ และความหนืดสุดท้ายเมื่อแป้งเย็นตัวลง (ความหนืดของแป้งหลังจากทำให้เย็นและเริ่มเกิดรีโทรเกรเดชัน) เท่ากับ 42.92, 39.75 และ 84.92 RVU ตามลำดับ

แป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีความหนืดทันทีเมื่อละลายในน้ำ และมีค่าความหนืดเริ่มต้นสูงกว่าหรือใกล้เคียงความหนืดสูงสุดของแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน ขณะที่ Jane and Chen (1994b) ได้เตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลสต่างกัน พบว่า แป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดแอมิโลสสูง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว มีความหนืดเริ่มต้นสูงกว่าแป้งดิบ ขณะที่ แป้งข้าวโพดแอมิโลสปานกลางมีความหนืดเริ่มต้นต่ำกว่าแป้งดิบ ความหนืดเริ่มต้นของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าสูงที่สุดเมื่อเตรียมแป้ง HA-GCWSS ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง แป้ง MA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีค่าเท่ากับ 59.08, 95.63 และ 82.25 RVU ตามลำดับ อุณหภูมิในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เม็ดแป้งมีการขยายตัวและบวมมากขึ้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้ง จึงเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก (Kaur, 2010) ดังปรากฏในรูปแบบลักษณะโครงสร้างผลึก เมื่อนำแป้งละลายน้ำเย็นมาละลายน้ำ น้ำจะเข้าไปแทรกในโครงสร้างเม็ดแป้ง และเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ทำให้เม็ดแป้งพองตัวและมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้แป้งสามารถละลายในน้ำเย็นและให้ความหนืดได้ทันที (Jane and Chen, 1994a)

เมื่อกวนแป้งเปียก HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ด้วยความเร็วคงที่ 160 รอบต่อนาที และเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 องศาเซลเซียส ความหนืดจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการพอง และแรงเฉือนจะทำให้เม็ดแป้งแตกออก แป้ง MA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ จะปรากฏลักษณะความหนืดที่คล้ายคลึงกับโปรไฟล์ของแป้งดิบ ซึ่งอาจเกิดจากเม็ดแป้งที่ยังพองตัวไม่เต็มที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงพองตัวและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส และรักษาระดับอุณหภูมินี้ไว้นาน 2 นาที พร้อม ๆ กับกวนอย่างต่อเนื่อง ความหนืดของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่เอมิโลสและเอมิโลเพกตินจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้ง โดยความหนืดสุดท้ายของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS สูง จะมีความหนืดใกล้เคียงกับแป้งดิบจากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน โดยมีความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดสูงกว่าแป้งดิบ แสดงว่าเม็ดแป้งของแป้งละลายน้ำเย็นที่เตรียมได้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดมากกว่า เมื่อมีการให้ความร้อนและการกวน



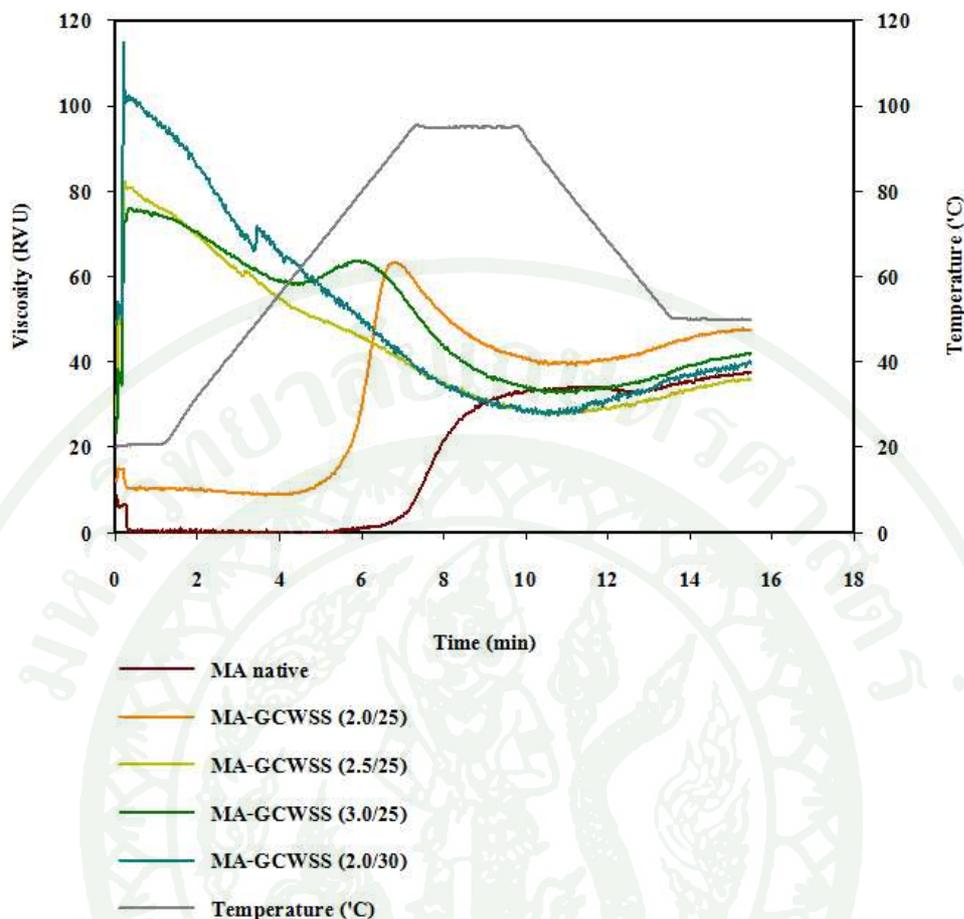
ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA

หมายเหตุ: HA native คือ แป้งดิบจากแป้ง HA

HA-GCWSS (1.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

HA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง MA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA

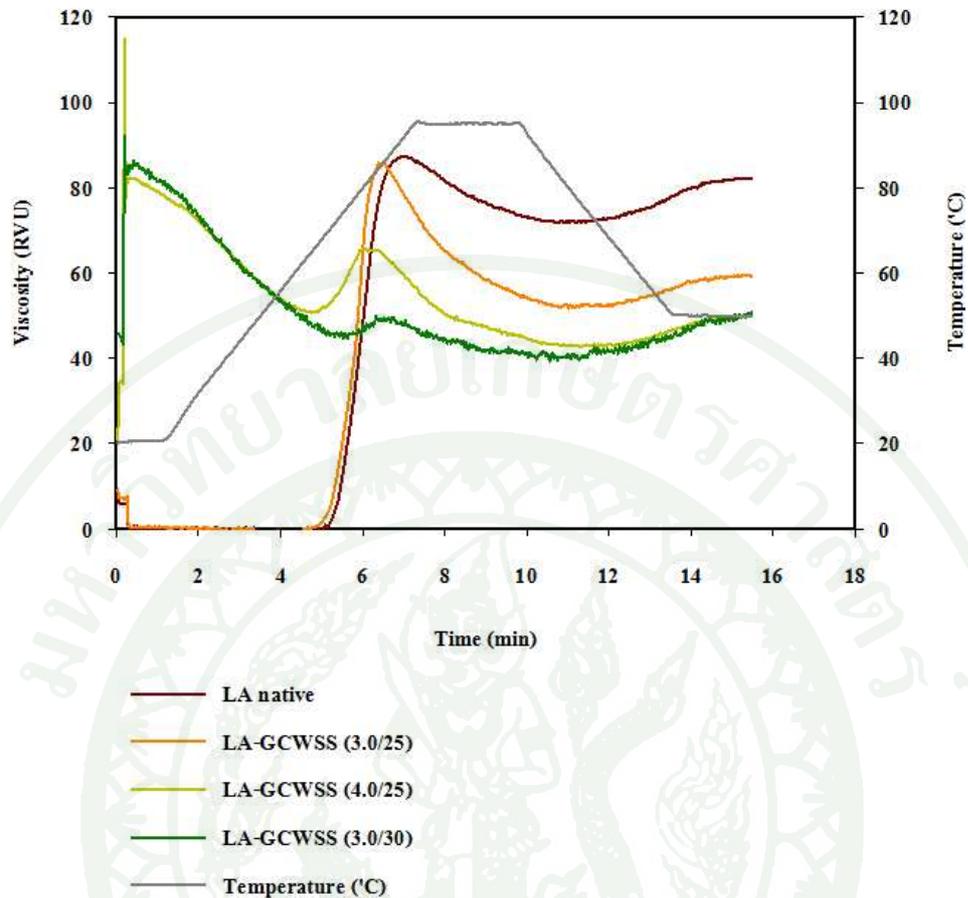
หมายเหตุ: MA native คือ แป้งดิบจากแป้ง MA

MA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.5/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.0/30) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA

หมายเหตุ: LA native คือ แป้งดิบจากแป้ง LA

LA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (4.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

LA-GCWSS (3.0/30) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 11 สมบัติความหนืดของ HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

แป้ง	สภาวะการเตรียม		อุณหภูมิ	เวลาที่เกิด	ความหนืด (RVU)		
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เริ่มเปลี่ยนแปลงความ หนืด (องศาเซลเซียส)	ความหนืด สูงสุด (นาทีก)	ความหนืด สูงสุด	ความหนืดสุดท้ายที่ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	ความหนืด สุดท้าย
HA	1.0	25	n.d.	8.90±0.13 <sup>b</sup>	16.34±0.83 <sup>k</sup>	16.42±0.08 <sup>l</sup>	18.79±1.12 <sup>i</sup>
HA	2.0	25	n.d.	1.40±0.04 <sup>g</sup>	49.92±0.83 <sup>g</sup>	18.75±0.07 <sup>k</sup>	29.54±1.12 <sup>h</sup>
HA	3.0	25	n.d.	1.12±0.07 <sup>c</sup>	59.08±2.47 <sup>g</sup>	28.83±0.06 <sup>h</sup>	39.54±1.47 <sup>fg</sup>
แป้งดิบ	-	-	88.18±1.17 <sup>b</sup>	8.03±0.11 <sup>c</sup>	27.71±0.18 <sup>j</sup>	24.25±0.04 <sup>j</sup>	42.92±0.12 <sup>ef</sup>
MA	2.0	25	76.00±0.07 <sup>c</sup>	6.75±0.05 <sup>c</sup>	64.34±1.29 <sup>f</sup>	42.17±0.01 <sup>d</sup>	48.04±0.65 <sup>cd</sup>
MA	2.5	25	n.d.	1.08±0.05 <sup>c</sup>	77.42±1.29 <sup>de</sup>	28.83±0.00 <sup>h</sup>	37.96±3.24 <sup>g</sup>
MA	3.0	25	n.d.	1.01±0.00 <sup>c</sup>	75.84±2.00 <sup>c</sup>	34.42±0.03 <sup>f</sup>	44.54±3.59 <sup>de</sup>
MA	2.0	30	n.d.	1.01±0.00 <sup>c</sup>	95.63±0.88 <sup>a</sup>	28.50±0.01 <sup>i</sup>	39.13±0.64 <sup>fg</sup>
แป้งดิบ	-	-	95.48±0.18 <sup>a</sup>	11.37±0.00 <sup>a</sup>	36.17±2.83 <sup>i</sup>	32.83±0.04 <sup>g</sup>	39.75±3.07 <sup>fg</sup>
LA	3.0	25	70.95±1.06 <sup>b</sup>	6.46±0.09 <sup>f</sup>	87.29±2.18 <sup>b</sup>	54.58±0.01 <sup>b</sup>	59.67±0.71 <sup>b</sup>
LA	4.0	25	n.d.	1.01±0.00 <sup>c</sup>	79.80±0.88 <sup>cd</sup>	45.17±0.00 <sup>c</sup>	50.29±0.41 <sup>c</sup>
LA	3.0	30	n.d.	1.04±0.00 <sup>c</sup>	82.25±0.82 <sup>c</sup>	41.50±0.00 <sup>c</sup>	51.50±0.82 <sup>c</sup>
แป้งดิบ	-	-	71.25±0.21 <sup>d</sup>	6.99±0.07 <sup>d</sup>	89.36±3.01 <sup>b</sup>	73.33±0.00 <sup>a</sup>	84.92±4.12 <sup>a</sup>

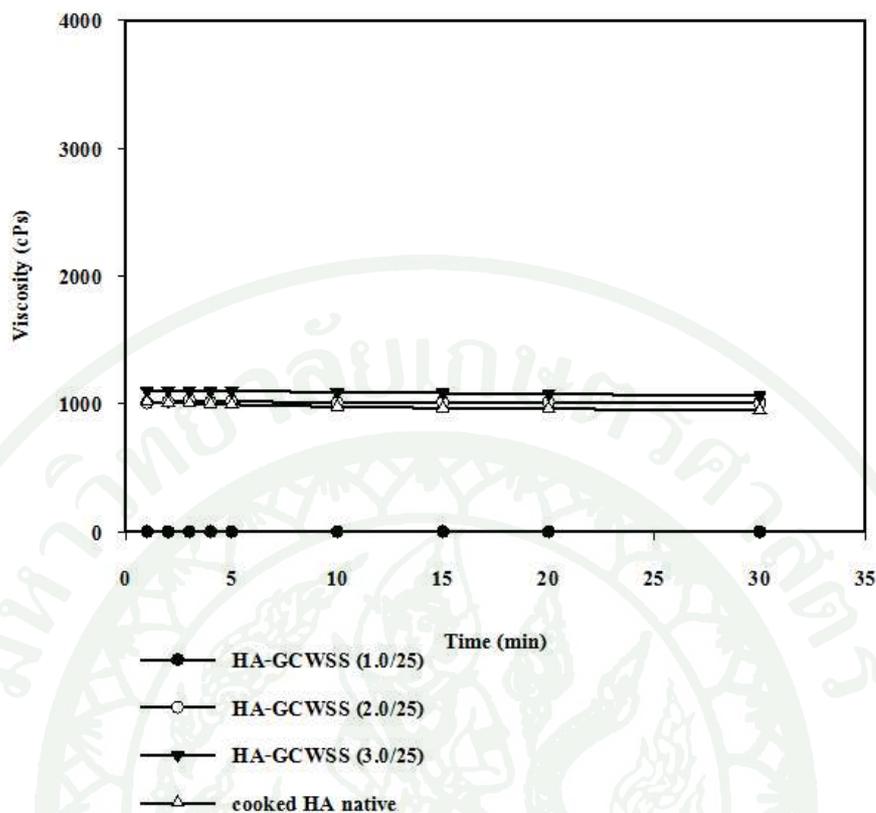
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

n.d. ไม่วิเคราะห์

## 2.9 ผลของความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วย Brookfield Viscometer

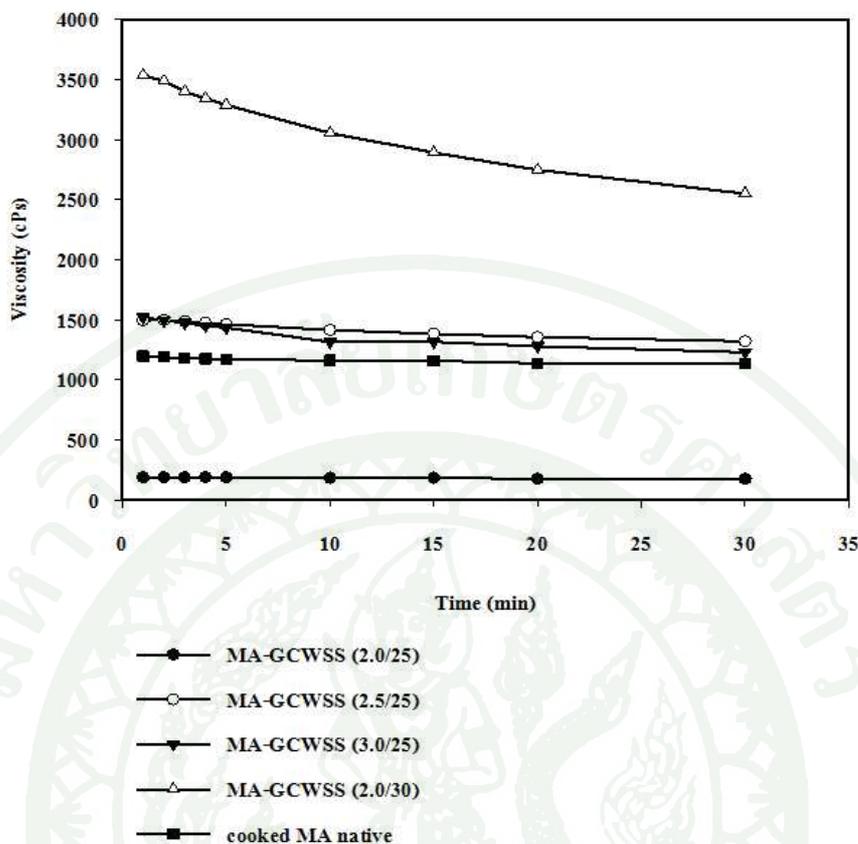
ลักษณะความหนืดของแป้งเปียก HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อกวนด้วยความเร็วคงที่ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยหัวเข็มหมายเลข 27 แสดงดังภาพที่ 36, 37 และ 38 ตามลำดับ และตารางที่ 12 เมื่อพิจารณาแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS สูง พบว่า แป้งเปียก HA-GCWSS มีความหนืดค่อนข้างคงที่กว่าแป้งเปียก MA-GCWSS และ LA-GCWSS โดยการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณต่างหรืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแป้ง MA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกค่อนข้างมาก Chen and Jane (1994b) ได้วิเคราะห์ความหนืดของแป้งเปียกของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งข้าวโพดแอมิโลสปานกลาง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเข้มข้น ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก กวนด้วยความเร็วคงที่ 75 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และ Bello-Pérez *et al.* (2000) ได้เตรียมแป้งเปียกของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งกล้วยเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และวิเคราะห์ความหนืดเมื่อกวนด้วยความเร็วคงที่ 20 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที พบว่า ความหนืดค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที แล้วย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยหัวเข็มหมายเลข 27 แก่แป้งเปียก HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดดังภาพที่ 39, 40 และ 41 ตามลำดับ และตารางที่ 13 เมื่อพิจารณาแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่มีค่า %CWS สูง พบว่า ความหนืดของแป้งเปียกจะลดลงเมื่อความเร็วในการกวนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมแบบ shear-thinning และเมื่อลดระดับความเร็วรอบลง ความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแป้งเปียกจากแป้งดิบ การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก MA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-GCWSS เตรียมที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ตามลำดับ มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกค่อนข้างมาก



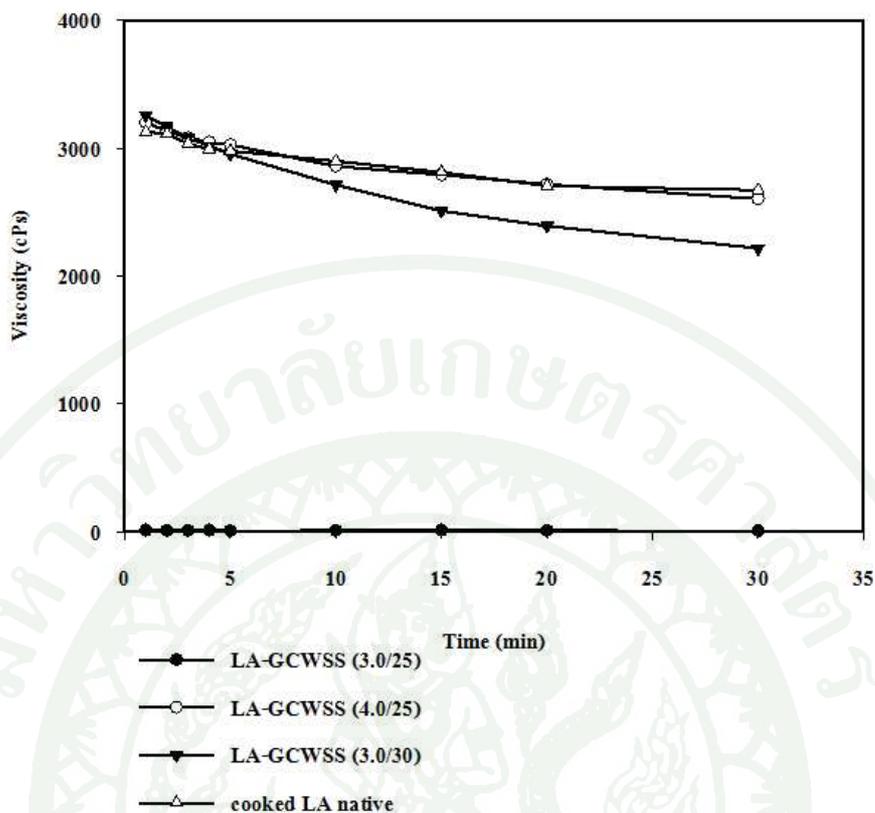
ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

หมายเหตุ: HA-GCWSS (1.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 HA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 HA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 cooked HA native คือ ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบเข้มข้น ร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



ภาพที่ 37 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก MA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

หมายเหตุ: MA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 MA-GCWSS (2.5/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 MA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 MA-GCWSS (2.0/30) คือ แป้ง MA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส  
 cooked MA native คือ ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบเข้มข้น ร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



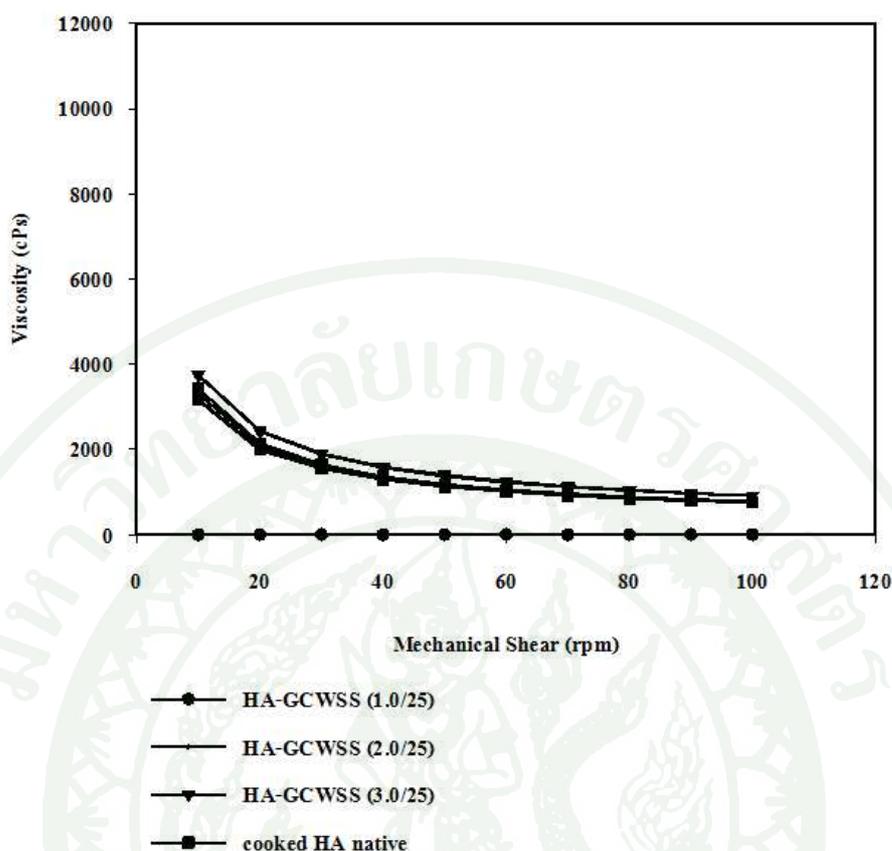
ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

หมายเหตุ: LA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 LA-GCWSS (4.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 LA-GCWSS (3.0/30) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส  
 cooked LA native คือ ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

ตารางที่ 12 ร้อยละความแตกต่างของความหนืดของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

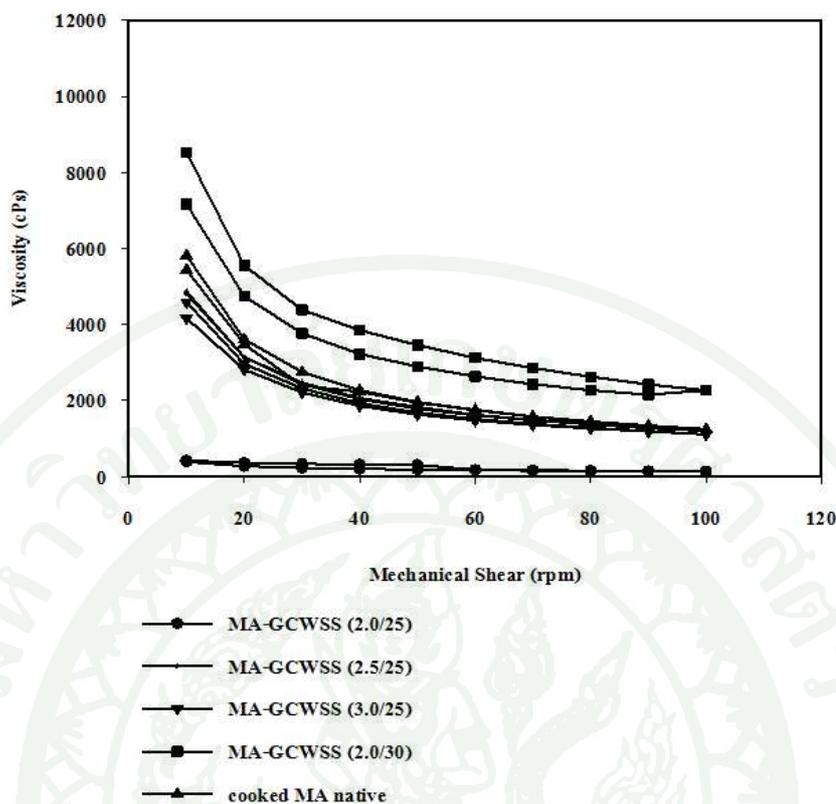
แป้ง	สภาวะการเตรียม		ความหนืดเริ่มต้น (cPs)	ความหนืดสุดท้าย (cPs)
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
HA	1.0	25	0.00±0.00 <sup>i</sup>	0.00±0.00 <sup>i</sup>
HA	2.0	25	1006.35±20.72 <sup>g</sup>	1006.15±32.31 <sup>fg</sup>
HA	3.0	25	1102.00±38.18 <sup>f</sup>	1062.50±23.33 <sup>ef</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	1195.50±17.68 <sup>c</sup>	1133.50±23.33 <sup>c</sup>
MA	2.0	25	187.50±0.00 <sup>h</sup>	175.00±0.00
MA	2.5	25	1496.00±65.05 <sup>d</sup>	1321.00±65.05 <sup>d</sup>
MA	3.0	25	1519.00±26.87 <sup>d</sup>	1229.00±11.31 <sup>d</sup>
MA	2.0	30	3535.50±44.55 <sup>a</sup>	2550.00±29.70 <sup>b</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	1016.50±12.20 <sup>g</sup>	947.90±20.65 <sup>h</sup>
LA	3.0	25	12.42±0.12 <sup>i</sup>	8.25±0.11 <sup>i</sup>
LA	4.0	25	3198.00±26.87 <sup>b</sup>	2604.00±111.72 <sup>ab</sup>
LA	3.0	30	3256.50±14.85 <sup>b</sup>	2216.50±64.35 <sup>c</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	3127.00±2.83 <sup>c</sup>	2673.00±8.49 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )



ภาพที่ 39 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: HA-GCWSS (1.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 HA-GCWSS (2.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 HA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง HA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 cooked HA native คือ ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง MA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: MA-GCWSS (2.0/25) คือ MA-GCWSS สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

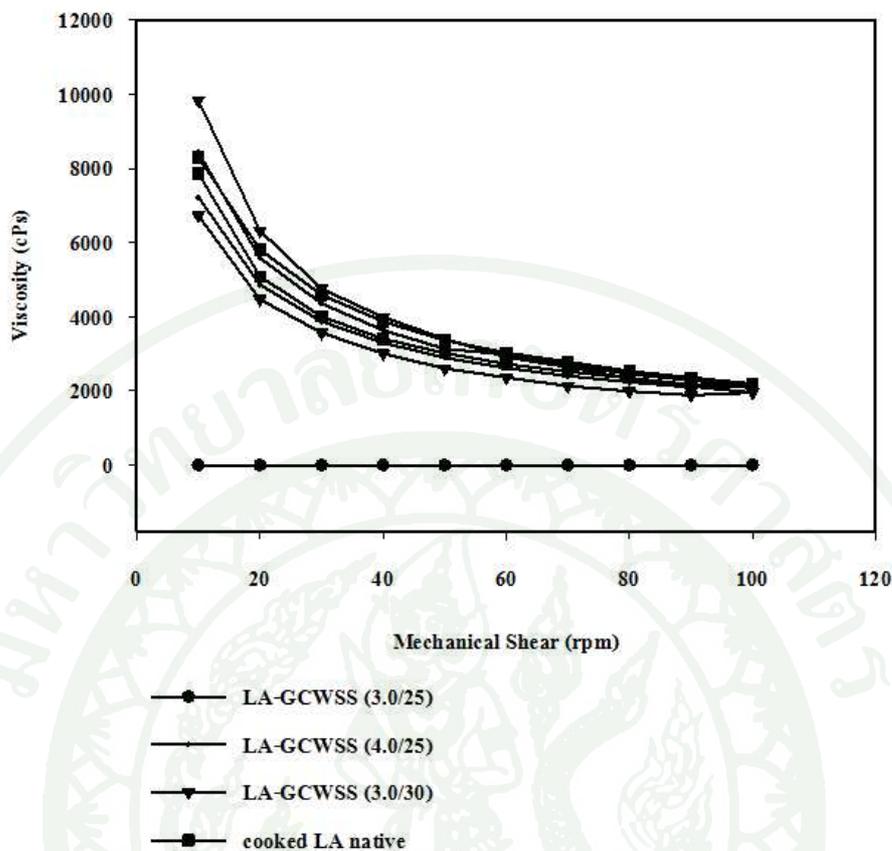
MA-GCWSS (2.5/25) คือ MA-GCWSS สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (3.0/25) คือ MA-GCWSS สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

MA-GCWSS (2.0/30) คือ MA-GCWSS สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ เป็น 1:20:2.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

cooked MA native คือ ตัวอย่างควบคุม โดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที



ภาพที่ 41 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: LA-GCWSS (3.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 LA-GCWSS (4.0/25) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  
 LA-GCWSS (3.0/30) คือ แป้ง LA-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส  
 cooked LA native คือ ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งดิบเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

**ตารางที่ 13** การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็ม หมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกววนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อ นาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

แป้ง	สภาวะการเตรียม		ความหนืดเริ่มต้น (cPs)	ความหนืดสุดท้าย (cPs)
	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
HA	1.0	25	0.00±0.00 <sup>f</sup>	0.00±0.00 <sup>i</sup>
HA	2.0	25	3150.00±212.13 <sup>c</sup>	3299.50±262.34 <sup>h</sup>
HA	3.0	25	3750.00±25.26 <sup>c</sup>	3737.50±17.68 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	3425.00±106.07 <sup>c</sup>	3175.00±70.71 <sup>h</sup>
MA	2.0	25	425.00±0.00 <sup>f</sup>	387.50±17.68 <sup>i</sup>
MA	2.5	25	4852.50±17.68 <sup>d</sup>	4812.50±17.68 <sup>c</sup>
MA	3.0	25	4590.00±14.14 <sup>d</sup>	4165.00±14.14 <sup>f</sup>
MA	2.0	30	8525.00±106.07 <sup>b</sup>	7162.50±53.03 <sup>b</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	5812.50±17.68 <sup>c</sup>	5434.00±21.21 <sup>d</sup>
LA	3.0	25	0.00±0.00 <sup>f</sup>	0.00±0.00 <sup>i</sup>
LA	4.0	25	8437.50±795.50 <sup>b</sup>	7225.00±35.36 <sup>b</sup>
LA	3.0	30	9837.50±88.39 <sup>a</sup>	6725.00±35.36 <sup>c</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	8300.00±636.40 <sup>b</sup>	7862.50±583.36 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

### 3. ผลการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS

#### 3.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เถ้า และค่า %CWS

ได้ทำการคัดแปรแป้ง HA และ LA ด้วยวิธีเชื่อมข้ามเพื่อเพิ่มพันธะโควาเลนต์ให้กับโมเลกุลแป้งด้วย STMP ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแป้งเท่ากับ 11 ที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากอบแห้ง และบดผ่านตะแกรงร่อนรียบรียแล้ว จึงนำมาเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการแขวนลอยในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง โดยนำมาแขวนลอยด้วยสารละลายเอทานอลที่สัดส่วน 1:20 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง (การเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS ใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 และแป้ง LA-CL-GCWSS ใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95) เตรียมที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส และแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH ดังนี้ แป้ง HA-CL-GCWSS ได้แปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0, 11.0 และ 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-CL-GCWSS ได้แปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0, 3.5 และ 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ทั้งนี้ ที่สภาวะการเตรียมดังกล่าว มีสัดส่วนโดยมวลและสัดส่วนโดยโมลของแป้ง น้ำ เอทานอล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 14

ผลได้ของผลิตภัณฑ์ (yield) แสดงดังตารางที่ 15 การเตรียมแป้ง HA-CL และ LA-CL มีผลได้ของผลิตภัณฑ์คิดเป็นร้อยละ 95.21 และ 96.05 ตามลำดับ เมื่อนำแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าว ทั้ง 2 ชนิด มาทำการเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะต่างกัน ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ระหว่างร้อยละ 78.37-88.66 และ 85.28-88.77 การเตรียมแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 88.77

ปริมาณเถ้าของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS แสดงดังตารางที่ 15 โดยมีค่าระหว่างร้อยละ 0.07-0.12 และ 0.20-4.90 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าของแป้ง HA-CL และ LA-CL มีค่าร้อยละ 0.10 และ 0.06 ตามลำดับ ปริมาณเถ้าของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีค่าสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 4.90 ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง ปริมาณเถ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ 3 M NaOH เพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าที่เพิ่มขึ้นในแป้งละลายน้ำเย็นเกิดจากเกลือที่หลงเหลืออยู่ภายในเม็ด

แป้ง ซึ่งมีผลทำให้เนื้อสัมผัสของแป้งเปียกมีความเนียน และช่วยให้การเตรียมแป้งเปียกทำได้ง่ายขึ้น (Chen and Jane, 1994b)

ค่า %CWS ของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS แสดงดังตารางที่ 15 โดยมีค่าระหว่างร้อยละ 80.39-86.56 และ 14.88-72.60 ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้ง HA-CL และ LA-CL มีค่า %CWS เท่ากับ 26.82 และ 98.63 ตามลำดับ ขณะที่ แป้ง HA-CL และ LA-CL มีค่า %CWS เท่ากับ 2.44 และ 0.80 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ค่า %CWS สูงที่สุดเท่ากับ 86.56 และ 72.60 ตามลำดับ (แป้ง HA-CL-GCWSS เมื่อเตรียมที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 และ 8.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้ค่า %CWS เท่ากับ 9.65 และ 78.30 ตามลำดับ ไม่ได้แสดงข้อมูลไว้ในตาราง) ขณะที่ เมื่อเตรียมแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 พบว่า แป้งเกิดเจลลาตินซ์ไม่สามารถรักษาโครงสร้างเม็ดแป้งไว้ได้ ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในการเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีผลทำให้ค่า %CWS เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ได้ทำการเตรียมแป้ง LA-CL-GCWSS ด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 60, 75, 80 และ 85 ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0, 2.5, 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีค่า %CWS เท่ากับ 13.06, 19.28, 20.08 และ 20.00 ตามลำดับ (ไม่ได้แสดงข้อมูลในตารางที่ 14) และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ 3 M NaOH ที่แต่ ละความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล พบว่า แป้งเกิดเจลลาตินซ์ จึงได้ทำการเตรียมแป้ง LA-CL-GCWSS โดยใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 เช่นเดียวกับการเตรียมแป้ง LA-GCWSS

**ตารางที่ 14** สกัดส่วนโดยมวล สกัดส่วนโดยโมลของแป้ง น้ำ เอทานอล และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในการเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เมื่อแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

แป้ง ข้าว	สภาวะการเตรียม			สกัดส่วนโดยมวล				สกัดส่วนโดยโมล				ระยะเวลาการ ทำปฏิกิริยา <sup>2</sup> (นาที)
	แป้ง (กรัม)	สารละลาย เอทานอล <sup>1</sup>	3 M NaOH (กรัม)	แป้ง	น้ำ	เอทานอล	โซเดียม ไฮดรอกไซด์	แป้ง	น้ำ	เอทานอล	โซเดียม ไฮดรอกไซด์	
CL-HA	1	20	10.0	1	20.93	8.00	1.07	1	193.78	28.99	4.46	200
	1	20	11.0	1	21.82	8.00	1.18	1	202.05	28.99	4.91	220
	1	20	12.0	1	22.71	8.00	1.29	1	210.32	28.99	5.36	240
CL-LA	1	20	3.0	1	3.68	19.00	0.32	1	34.06	68.84	1.34	60
	1	20	3.5	1	4.13	19.00	0.38	1	38.19	68.84	1.56	70
	1	20	4.0	1	4.57	19.00	0.43	1	42.33	68.84	1.79	80

หมายเหตุ: <sup>1</sup> สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 สำหรับเตรียม HA-CL-GCWSS และร้อยละ 95 สำหรับเตรียม LA-CL-GCWSS

<sup>2</sup> ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาคิดที่ปริมาณแป้งเริ่มต้นน้ำหนัก 100 กรัม

น้ำหนักโมเลกุลของแป้ง น้ำ เอทานอล และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 162, 18, 46 และ 40 ตามลำดับ

ตารางที่ 15 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เถ้า และค่า %CWS ของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน

แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	ร้อยละผลได้ของ	ร้อยละเถ้า	ร้อยละความสามารถในการละลายน้ำเย็น
HA-CL	10.0	88.66±1.51 <sup>b</sup>	0.07±0.01 <sup>b</sup>	80.39±1.71 <sup>c</sup>
HA-CL	11.0	81.12±1.22 <sup>c</sup>	0.11±0.00 <sup>b</sup>	83.34±2.97 <sup>c</sup>
HA-CL	12.0	78.37±0.76 <sup>c</sup>	0.12±0.01 <sup>b</sup>	86.56±0.79 <sup>b</sup>
HA-CL	-	95.21±1.32 <sup>a</sup>	0.10±0.01 <sup>b</sup>	2.44±0.11 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	-	26.82±0.25 <sup>e</sup>
LA-CL	3.0	88.77±1.10 <sup>b</sup>	0.20±0.01 <sup>b</sup>	14.88±0.74 <sup>f</sup>
LA-CL	3.5	85.28±2.74 <sup>b</sup>	4.90±0.90 <sup>a</sup>	72.60±1.73 <sup>d</sup>
LA-CL	4.0	n.d.	n.d.	n.d.
LA-CL	-	96.05±2.15 <sup>a</sup>	0.06±0.02 <sup>b</sup>	0.80±0.03 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	-	-	98.63±0.81 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากเมล็ดแป้งเกิดการแตกตัว

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

### 3.2 ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ )

แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีค่าการละลาย กำลังการพองตัว และ สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) แสดงดังตารางที่ 16 โดยมีค่าการละลายระหว่างร้อยละ 10.61-13.71 และ 2.75-9.66 ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้ง HA-CL และ LA-CL มีค่าการละลายคิด เป็นร้อยละ 13.43 และ 2.96 ตามลำดับ ขณะที่ แป้ง HA-CL และ LA-CL มีค่าการละลายคิดเป็นร้อย ละ 0.84 และ 1.23 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนัก แป้งแห้ง ให้ค่าการละลายสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 13.71 และ 9.66 ตามลำดับ แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS สูงสุด จะให้ค่าการละลายใกล้เคียงกับค่าการละลายสูงสุด

กำลังการพองตัวของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีค่าระหว่าง 12.18-13.43 และ 4.28-10.16 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้ง HA-CL และ LA-CL มี กำลังการพองตัวเท่ากับ 13.18 และ 14.04 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ แป้ง HA-CL และ LA-CL มี กำลังการพองตัวเท่ากับ 2.60 และ 2.85 กรัมต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้กำลังการพองตัวสูงที่สุดเท่ากับ 13.41 และ 10.16 กรัม ต่อกรัมแป้ง ตามลำดับ แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS สูงสุด จะให้ ค่ากำลังการพองตัวใกล้เคียงกับค่ากำลังการพองตัวสูงสุด

แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ระหว่างร้อยละ 0.12-0.13 และ 0.06-0.11 ตามลำดับ แป้งเปียกจากแป้ง HA-CL และ LA-CL มี สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) คิดเป็นร้อยละ 0.29 และ 0.31 ตามลำดับ แป้ง HA-CL และ LA-CL มีสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) คิดเป็นร้อยละ 0.03 และ 0.03 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 และ 12.0 โดยน้ำหนักแป้ง แห้ง ให้สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) สูงที่สุดเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 0.13 และแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ให้สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.11 แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่ให้ ค่า %CWS สูงสุด จะให้สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ใกล้เคียงกับสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) สูงสุด

ตารางที่ 16 ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ ) ของ HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน

แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	ร้อยละการพองตัว	กำลังการพองตัว	สัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ( $\phi$ )
HA-CL	10.0	10.61±0.00 <sup>d</sup>	12.18±0.00 <sup>c</sup>	0.12±0.00 <sup>d</sup>
HA-CL	11.0	12.29±0.05 <sup>c</sup>	13.43±0.09 <sup>b</sup>	0.13±0.00 <sup>c</sup>
HA-CL	12.0	13.71±0.05 <sup>a</sup>	12.95±0.16 <sup>d</sup>	0.13±0.00 <sup>c</sup>
HA-CL	-	0.84±0.03 <sup>i</sup>	2.60±0.01 <sup>i</sup>	0.03±0.00 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	13.43±0.05 <sup>b</sup>	13.18±0.00 <sup>c</sup>	0.29±0.01 <sup>b</sup>
LA-CL	3.0	2.75±0.00 <sup>g</sup>	4.28±0.06 <sup>g</sup>	0.06±0.00 <sup>f</sup>
LA-CL	3.5	9.66±0.03 <sup>c</sup>	10.16±0.01 <sup>f</sup>	0.11±0.00 <sup>e</sup>
LA-CL	4.0	n.d.	n.d.	n.d.
LA-CL	-	1.23±0.03 <sup>h</sup>	2.85±0.01 <sup>h</sup>	0.04±0.00 <sup>g</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	2.96±0.05 <sup>f</sup>	14.04±0.01 <sup>a</sup>	0.32±0.01 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างควบคุมที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการแตกตัว

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

### 3.3 องค์ประกอบของแอมิโลส

ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS แสดงดังตารางที่ 17 โดยมีค่าระหว่างร้อยละ 38.90-40.04 และ 8.92-9.66 ตามลำดับ แป้ง HA-CL และ LA-CL มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 39.58 และ 9.41 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 40.04 และ 9.66 ตามลำดับ ปริมาณแอมิโลสในแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีค่าใกล้เคียงกับแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 17 ปริมาณแอมิโลสของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน

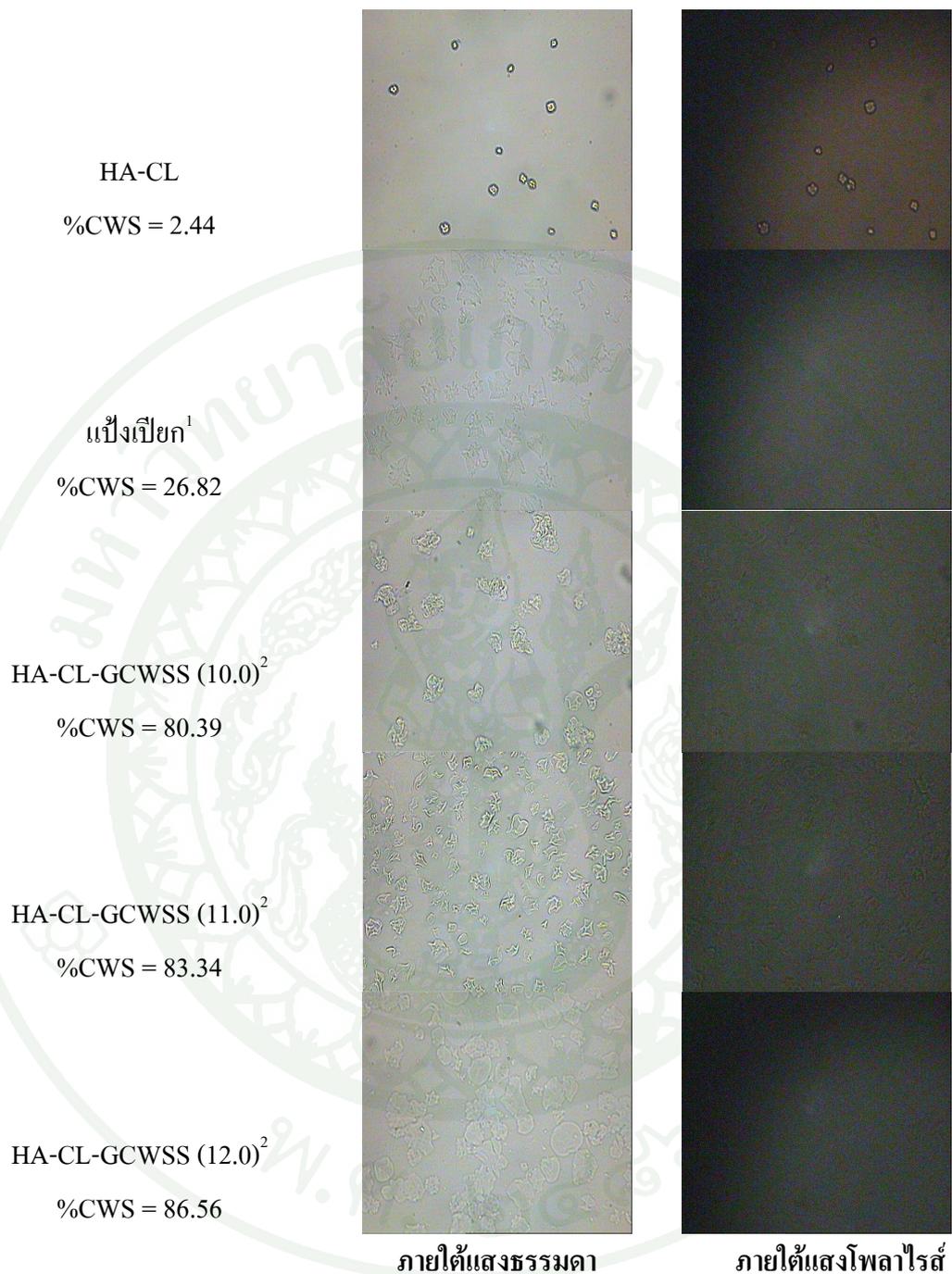
แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	ร้อยละปริมาณแอมิโลส
HA-CL	10.0	40.04±0.39 <sup>a</sup>
HA-CL	11.0	39.69±0.10 <sup>a</sup>
HA-CL	12.0	38.90±0.30 <sup>b</sup>
HA-CL	-	39.58±0.54 <sup>ab</sup>
LA-CL	3.0	9.66±0.26 <sup>c</sup>
LA-CL-	3.5	8.92±0.21 <sup>d</sup>
LA-CL	4.0	n.d.
LA-CL	-	9.41±0.06 <sup>cd</sup>

หมายเหตุ: n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากเมล็ดแป้งเกิดการแตกตัว

ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

### 3.4 ลักษณะรูปร่าง การเกิดกากบาท (maltese cross) และ birefringence ของเม็ดแป้ง

เมื่อนำแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดาที่กำลังขยาย 50 เท่า แสดงดังภาพที่ 42 และ 43 ตามลำดับ พบว่า ขณะเตรียมตัวอย่าง เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำได้ทันทีทำให้มีขนาดใหญ่กว่าแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน โดยจะมีลักษณะคล้ายกับเม็ดแป้งจากแป้งเปียกของแป้งครอสลิงค์ สำหรับแป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีขนาดไม่แตกต่างจากแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน เมื่อนำไปวิเคราะห์ภายใต้แสงโพลาไรส์ แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่ให้ค่า %CWS มากกว่า 70 และแป้งเปียกจากแป้งครอสลิงค์ของแป้งข้าวชนิดเดียวกัน จะไม่ปรากฏลักษณะ birefringence แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง (Jane *et al.*, 1986) ขณะที่แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และแป้ง HA-CL และ LA-CL จะยังคงปรากฏลักษณะ birefringence



ภาพที่ 42 ภาพเม็ดแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง

<sup>2</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง



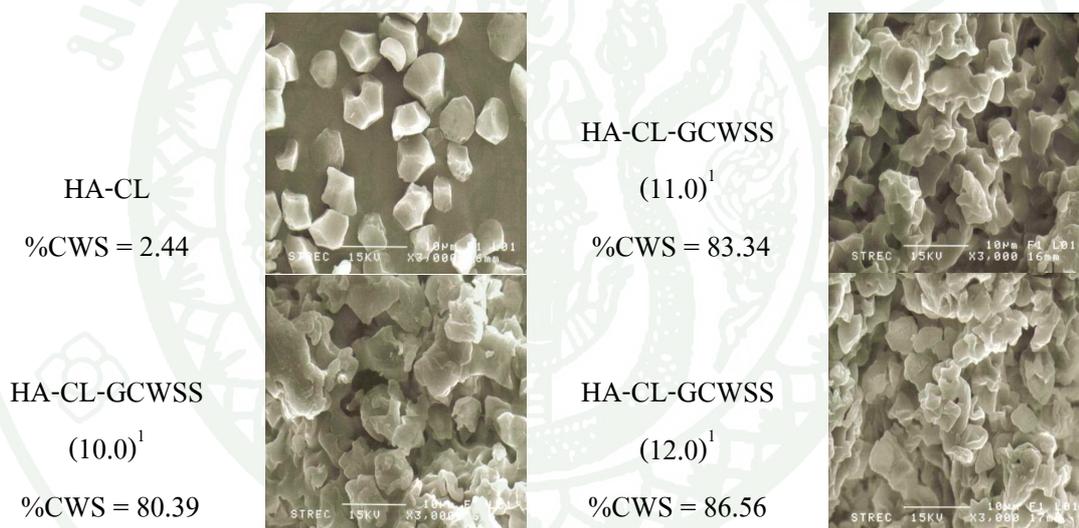
ภาพที่ 43 ภาพเมล็ดแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน ภายใต้แสงธรรมดา และแสงโพลาไรส์กำลังขยาย 50 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง

<sup>2</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

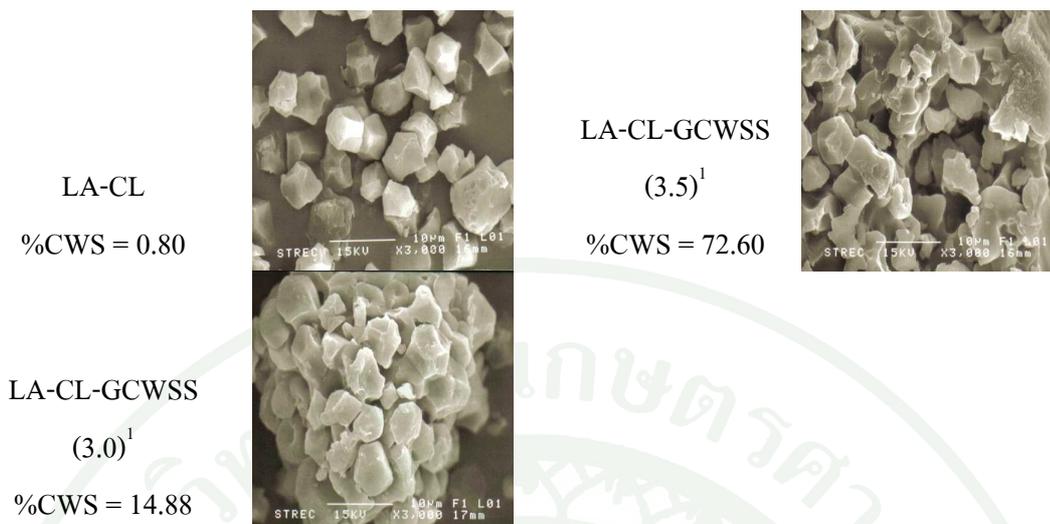
### 3.5 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง

ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงดังภาพที่ 44 และ 45 ตามลำดับ พบว่า เม็ดแป้งจะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน มีรอยเว้าแหว่ง รูปร่างเหี่ยว และบิดเบี้ยว ยกเว้น แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง จะมีรูปร่างไม่ค่อยแตกต่างจากเม็ดแป้งของแป้งครอสลิงค์ แต่ยังคงมีการหลอมเชื่อมติดกันอยู่ ลักษณะของเม็ดแป้งที่เกิดการหลอมเชื่อมติดกันนี้อาจมีผลต่อการล้างเกลือที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการหยุดปฏิกิริยา ดังที่อธิบายไว้ใน การเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น เป็นผลให้ปริมาณเกลือของแป้งละลายน้ำเย็นมีค่าสูงกว่าแป้งครอสลิงค์ (ตารางที่ 16)



ภาพที่ 44 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

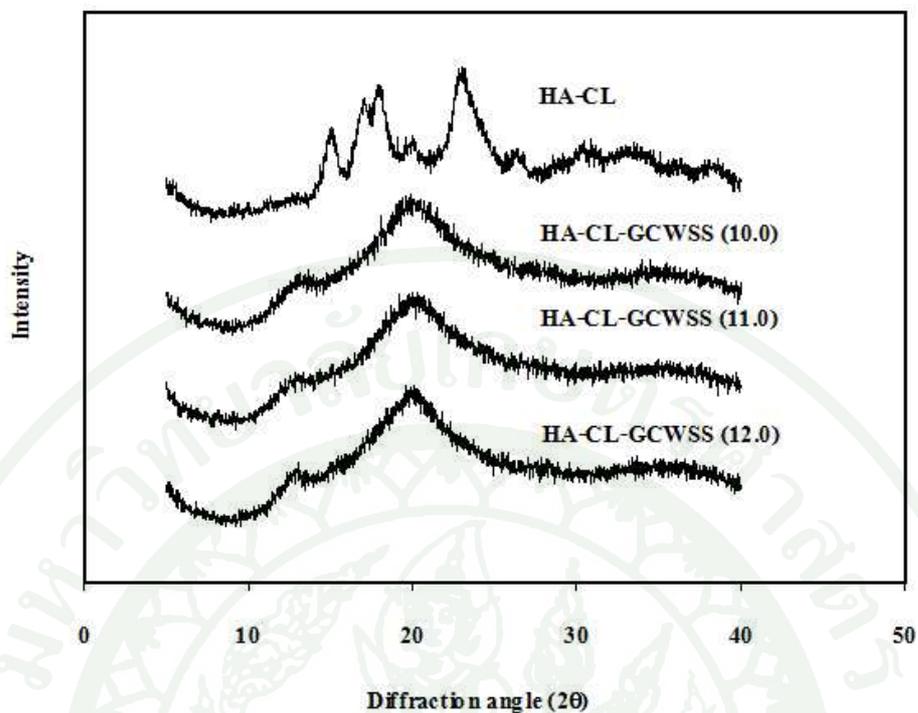


ภาพที่ 45 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ตัวเลขภายในวงเล็บ หมายถึง ปริมาณสัดส่วนของ 3 M NaOH โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

### 3.6 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง

ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer แสดงดังภาพที่ 46 และ 47 ตามลำดับ พบว่า แป้ง HA-CL-GCWSS จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ V และแป้ง LA-CL-GCWSS จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบอสังฐาน ลักษณะรูปแบบโครงสร้างผลึกทั้ง 2 แบบ สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (French and Murphy, 1977) ขณะที่แป้ง HA-CL, LA-CL และแป้ง LA-CL-GCWSS ที่มีค่า %CWS ต่ำ ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A



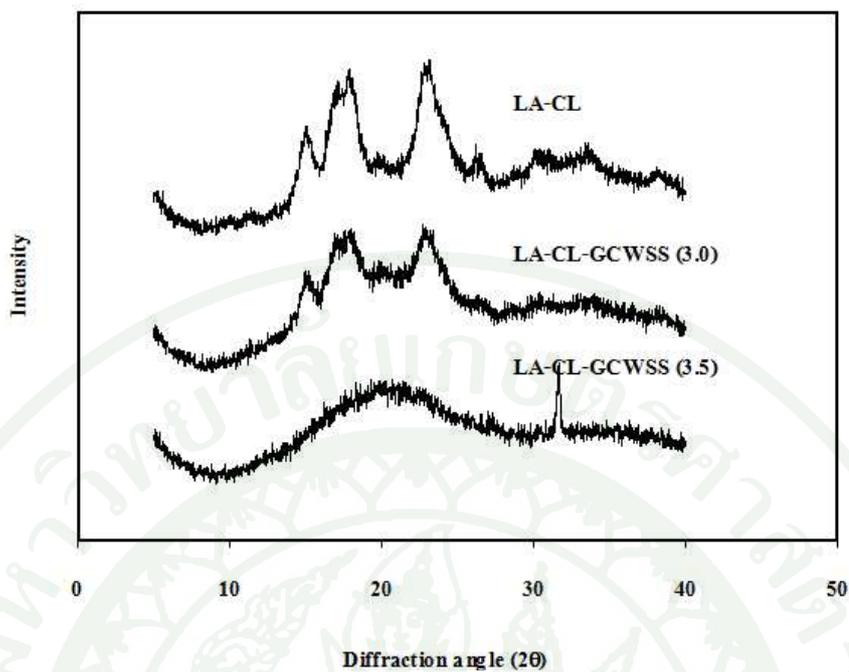
ภาพที่ 46 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแปรง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer

หมายเหตุ: HA-CL คือ แปรงครอสลิงค์จากแปรงข้าวแอมิโลสสูง

HA-CL-GCWSS (10.0) คือ แปรง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแปรงแห้ง

HA-CL-GCWSS (11.0) คือ แปรง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแปรงแห้ง

HA-CL-GCWSS (12.0) คือ แปรง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแปรงแห้ง



ภาพที่ 47 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง x-ray diffractometer

หมายเหตุ: LA-CL คือ แป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ

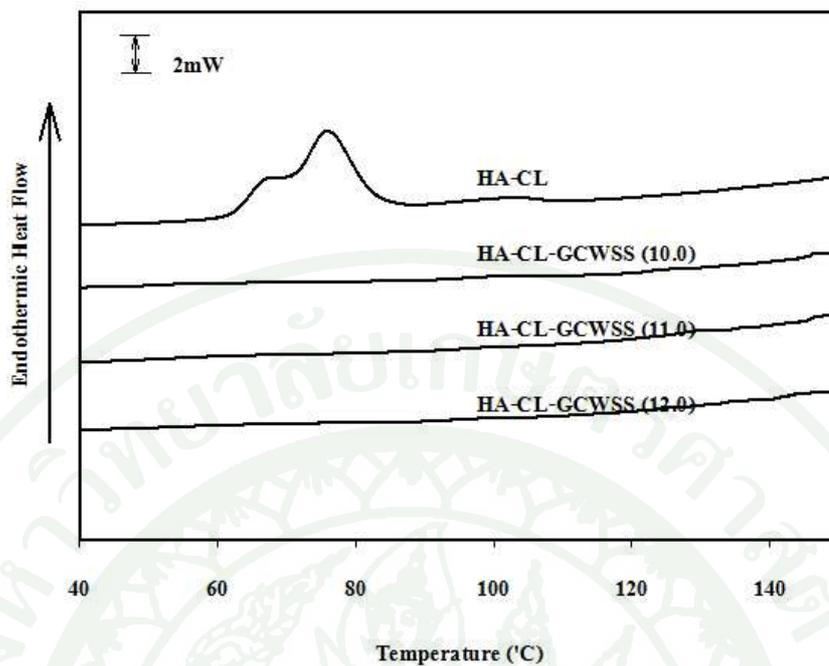
LA-CL-GCWSS (3.0) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

LA-CL-GCWSS (3.5) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

### 3.9 คุณลักษณะทางอุณหพลศาสตร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งครอส-ลิงค์ และแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงค์ แสดงดังภาพที่ 48 และ 49 ตามลำดับ และตารางที่ 18 แป้ง HA-CL และ LA-CL ปรากฏพีคที่ใช้ในการดูพลังงานของตำแหน่งแรก โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_o$ ) 58.31 และ 59.14 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_p$ ) 75.92 และ 67.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_c$ ) 85.85 และ 76.11 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta H$ ) 17.34 และ 15.81 จูลต่อกรัม ตามลำดับ พีคตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเกิดจากการหลอมละลายของสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับไขมัน จะปรากฏเฉพาะแป้ง HA-CL เท่านั้น โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_o$ ) 90.88 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_p$ ) 102.17 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_c$ ) 108.44 องศาเซลเซียส และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta H$ ) 0.86 จูลต่อกรัม

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงค์ พบว่า แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_p$ ) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $T_c$ ) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ( $\Delta H$ ) ของพีคตำแหน่งที่ 1 ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน มีค่าต่ำกว่าแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวชนิดเดียว ทั้งนี้ ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็น เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายใน ทำให้มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ (Jane *et al.*, 1986; Chen and Jane, 1994b) วิธีการดัดแปรแป้งด้วยการแขวนลอยในแอลกอฮอล์ร่วมกับต่างจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง (Chen and Jane, 1994a และ Singh and Singh, 2003)



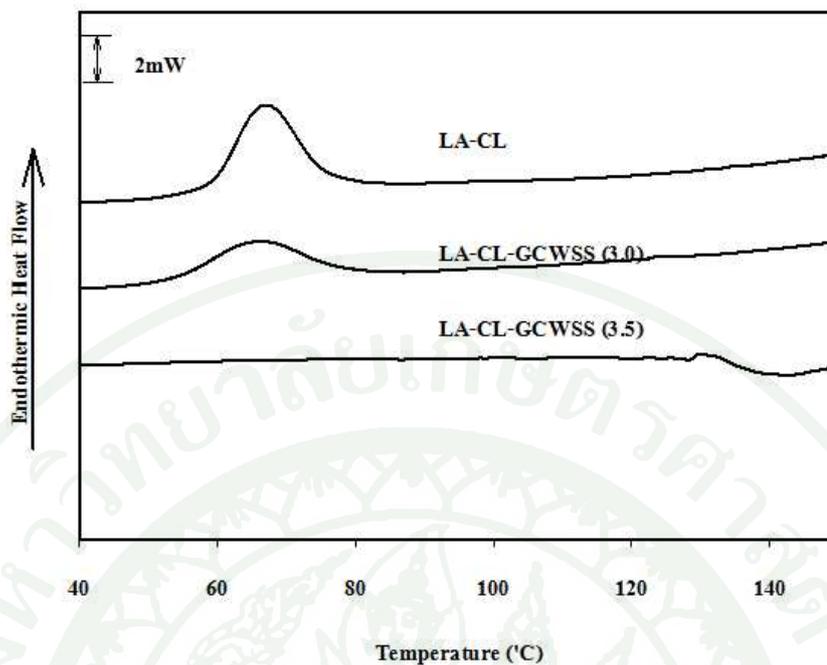
ภาพที่ 48 การเกิดเจลาตินไนเซชันของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: HA-CL คือ แป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวแอมิโลสสูง

HA-CL-GCWSS (10.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

HA-CL-GCWSS (11.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

HA-CL-GCWSS (12.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง



ภาพที่ 49 การเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: LA-CL คือ แป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ

LA-CL-GCWSS (3.0) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

LA-CL-GCWSS (3.5) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

ตารางที่ 18 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเจลาติโนเซชันแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อ กรัมแป้งแห้ง)	พีคที่หนึ่ง				พีคที่สอง			
		To (องศาเซลเซียส)	Tp (องศาเซลเซียส)	Tc (องศาเซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	To (องศาเซลเซียส)	Tp (องศาเซลเซียส)	Tc (องศาเซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)
HA-CL	10.0	50.25±0.00 <sup>bc</sup>	57.25±0.11 <sup>d</sup>	79.30±0.53 <sup>bc</sup>	0.60±0.03 <sup>c</sup>	92.65±0.47 <sup>ab</sup>	101.25±1.30 <sup>ab</sup>	108.06±3.31 <sup>ns</sup>	0.40±0.07 <sup>b</sup>
HA-CL	11.0	47.03±3.13 <sup>cd</sup>	61.50±4.00 <sup>cd</sup>	82.76±5.34 <sup>ab</sup>	0.80±0.06 <sup>c</sup>	93.46±0.54 <sup>a</sup>	99.92±0.12 <sup>bc</sup>	105.81±1.81 <sup>ns</sup>	0.13±0.05 <sup>c</sup>
HA-CL	12.0	48.13±2.22 <sup>cd</sup>	66.59±0.12 <sup>bc</sup>	87.65±0.82 <sup>a</sup>	0.67±0.05 <sup>c</sup>	94.90±1.63 <sup>a</sup>	98.77±0.37 <sup>c</sup>	103.87±0.60 <sup>ns</sup>	0.12±0.03 <sup>c</sup>
HA-CL	-	58.31±0.13 <sup>a</sup>	75.92±0.12 <sup>a</sup>	85.85±4.91 <sup>a</sup>	17.34±0.70 <sup>a</sup>	90.88±0.33 <sup>b</sup>	102.17±0.00 <sup>a</sup>	108.44±0.21 <sup>ns</sup>	0.86±0.04 <sup>a</sup>
LA-CL	3.0	53.47±0.03 <sup>b</sup>	66.00±0.00 <sup>bc</sup>	78.69±0.08 <sup>bc</sup>	9.73±0.05 <sup>c</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LA-CL	3.5	44.90±2.99 <sup>d</sup>	70.83±6.36 <sup>ab</sup>	86.72±0.40 <sup>a</sup>	1.63±0.12 <sup>d</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LA-CL	-	59.14±0.25 <sup>a</sup>	67.00±0.24 <sup>bc</sup>	76.11±0.03 <sup>c</sup>	15.81±0.10 <sup>b</sup>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

หมายเหตุ: n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากไม่ปรากฏพีค

ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

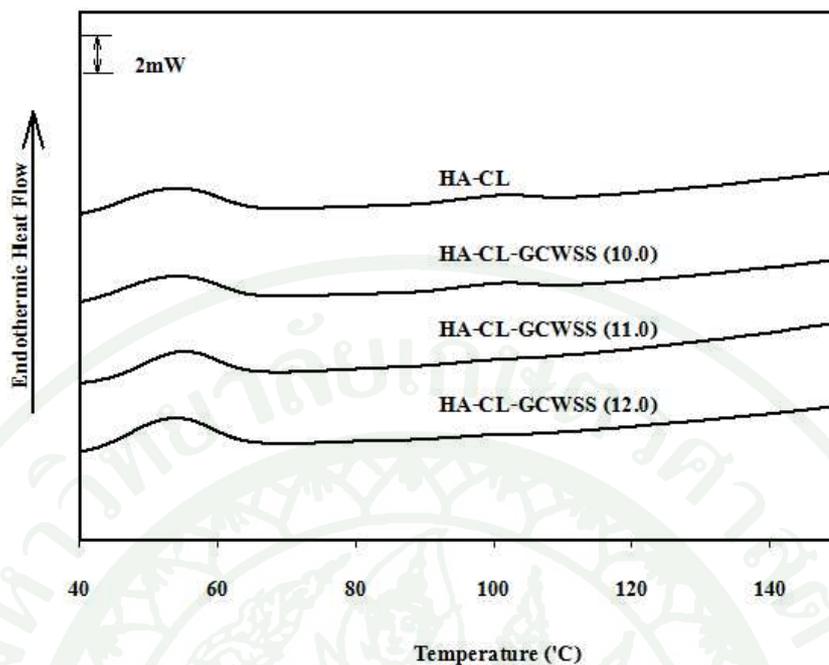
ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

To (Onset temperature) อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติโนเซชัน, Tp (Peak temperature) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลาติโนเซชัน,

Tc (Conclusion temperature) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลาติโนเซชัน และ  $\Delta H$  (Enthalpy) ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชัน

ผลจากการนำแป้ง HA-CL, LA-CL, HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 50 และ 51 ตามลำดับ และตารางที่ 19 แป้งรีโทรเกรด HA-CL ยังคงปรากฏพีคที่ใช้ในการดูดพลังงาน (endothermic peak) 2 ตำแหน่ง ขณะที่ แป้ง LA-CL ไม่ปรากฏพีคตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไขมัน แป้งรีโทรเกรด HA-CL และ LA-CL มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก ( $T_o$ ) (40.92 และ 41.79 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ต่ำกว่าพีคตำแหน่งที่ 1 ของการเกิดเจลาคีโนเซชัน (58.31 และ 59.14 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เป็นผลให้อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก ( $T_p$ ) (53.50 และ 54.00 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการหลอมผลึก ( $T_c$ ) (65.07 และ 62.46 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) และพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ( $\Delta H$ ) (8.02 และ 0.75 จูลต่อกรัม ตามลำดับ) มีค่าต่ำกว่ากระบวนการเกิดเจลาคีโนเซชันด้วย ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างที่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของแป้งรีโทรเกรด HA-CL และ LA-CL นี้ มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกน้อยกว่าแป้งครอสลิงค์ และโครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างของแอมิโลส โดยสามารถเกิดการเปลี่ยนสถานะได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่านั่นเอง (Vandeputte et al., 2003)

แป้งรีโทรเกรด HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก ( $T_c$ ) และอุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก ( $T_p$ ) สูงกว่าแป้งรีโทรเกรดจากครอสลิงค์ของแป้งข้าวชนิดเดียวกัน โดยมีพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก ( $\Delta H$ ) ระหว่าง 6.59-7.96 และ 0.71-1.14 ตามลำดับ และร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน (%R) จากพีคตำแหน่งที่ 1 มีค่าระหว่างร้อยละ 38.00-45.91 และ 4.49-7.21 ตามลำดับ ค่าร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันจะบ่งบอกถึงแนวโน้มความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกตินของแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้งครอสลิงค์ เปรียบเทียบกับแป้งครอสลิงค์ พบว่า แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลเพกตินใกล้เคียงกับแป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน ขณะที่พีคตำแหน่งที่ 2 พบเฉพาะแป้งรีโทรเกรด HA-CL-GCWSS



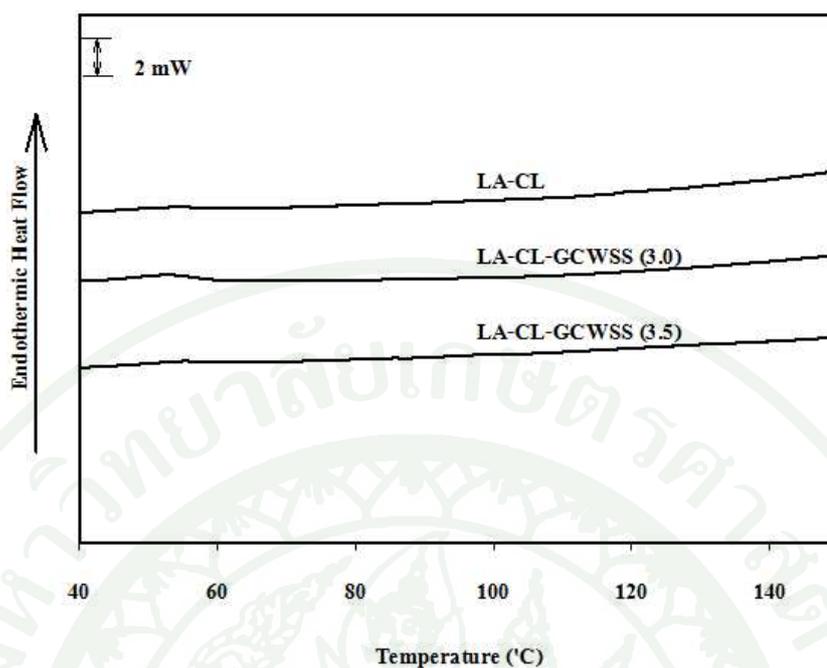
ภาพที่ 50 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: HA-CL คือ แป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวแอมิโลสสูง

HA-CL-GCWSS (10.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

HA-CL-GCWSS (11.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

HA-CL-GCWSS (12.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง



ภาพที่ 51 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

หมายเหตุ: LA-CL คือ แป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ

LA-CL-GCWSS (3.0) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

LA-CL-GCWSS (3.5) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

ตารางที่ 19 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งรีโทรเกรด HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์โดยเครื่อง DSC

แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อ กรัมแป้งแห้ง)	พีคที่หนึ่ง					พีคที่สอง				
		To (องศา เซลเซียส)	Tp (องศา เซลเซียส)	Tc (องศา เซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	%R	To (องศา เซลเซียส)	Tp (องศา เซลเซียส)	Tc (องศา เซลเซียส)	$\Delta H$ (จูลต่อกรัม)	
HA-CL	10.0	41.53±0.39 <sup>c</sup>	54.33±0.71 <sup>ns</sup>	64.77±0.94 <sup>a</sup>	7.54±0.69 <sup>a</sup>	43.48	92.47±0.69 <sup>ns</sup>	98.34±1.18 <sup>b</sup>	109.59±0.12 <sup>a</sup>	0.21±0.11 <sup>b</sup>	
HA-CL	11.0	43.92±0.37 <sup>ab</sup>	54.75±0.35 <sup>ns</sup>	64.66±0.51 <sup>a</sup>	6.59±0.16 <sup>b</sup>	38.00	91.89±0.33 <sup>ns</sup>	99.84±0.47 <sup>ab</sup>	105.66±0.10 <sup>b</sup>	0.16±0.06 <sup>b</sup>	
HA-CL	12.0	41.72±0.03 <sup>bc</sup>	53.59±0.12 <sup>ns</sup>	64.31±0.18 <sup>ab</sup>	7.96±0.15 <sup>a</sup>	45.91	91.91±1.08 <sup>ns</sup>	98.83±1.41 <sup>b</sup>	106.04±2.31 <sup>b</sup>	0.15±0.04 <sup>b</sup>	
HA-CL	-	40.92±2.40 <sup>c</sup>	53.50±1.41 <sup>ns</sup>	65.07±0.24 <sup>a</sup>	8.02±2.25 <sup>a</sup>	46.25	90.54±0.47 <sup>ns</sup>	101.79±0.79 <sup>a</sup>	108.75±0.47 <sup>ab</sup>	1.13±0.03 <sup>a</sup>	
LA-CL	3.0	44.39±0.12 <sup>a</sup>	53.70±0.19 <sup>ns</sup>	62.01±0.52 <sup>c</sup>	1.14±0.02 <sup>c</sup>	7.21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
LA-CL	3.5	45.14±0.52 <sup>a</sup>	54.59±0.12 <sup>ns</sup>	63.45±1.73 <sup>abc</sup>	0.71±0.17 <sup>c</sup>	4.49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
LA-CL	-	41.79±0.10 <sup>bc</sup>	54.00±0.24 <sup>ns</sup>	62.46±1.10 <sup>bc</sup>	0.75±0.09 <sup>c</sup>	4.74	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	

หมายเหตุ: n.d. ไม่วิเคราะห์เนื่องจากไม่ปรากฏพีค

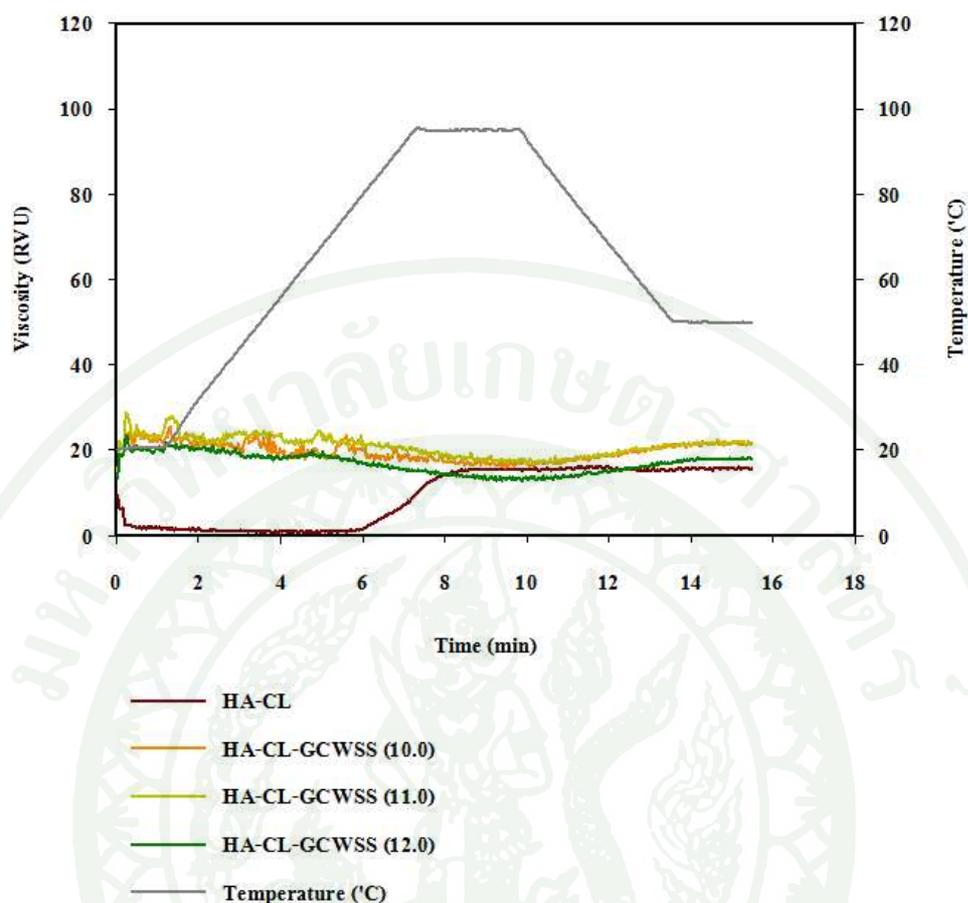
ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

To (Onset temperature) อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาติไนเซชัน, Tp (Peak temperature) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาติไนเซชัน, Tc (Conclusion temperature) อุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาติไนเซชัน และ  $\Delta H$  (Enthalpy) ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชัน  
%R (%Retrogradation) ร้อยละของการเกิดรีโทรเกรดชัน มีค่าเท่ากับ  $(\Delta H_{\text{แป้งรีโทรเกรด}} / \Delta H_{\text{แป้งครอสลิงค์ในการเกิดเจลลาติไนเซชัน}}) \times 100$

### 3.7 ลักษณะความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมความหนืดด้วยเครื่อง RVA ของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS แสดงดังภาพที่ 52 และ 53 ตามลำดับ และตารางที่ 20 ตามลำดับ แป้ง LA-CL มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 72.68 องศาเซลเซียส แป้ง HA-CL และ LA-CL มีเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของความหนืด เท่ากับ 9.50 และ 6.90 นาที ตามลำดับ ความหนืดสูงสุด (ความหนืดของเม็ดแป้งขณะพองตัวเต็มที่) เท่ากับ 15.54 และ 20.42 RVU ตามลำดับ ความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เท่ากับ 15.25 และ 21.17 RVU ตามลำดับ และความหนืดสุดท้ายเมื่อแป้งเย็นตัวลง (ความหนืดของแป้งหลังจากทำให้เย็นและเริ่มเกิดรีโทรเกรเดชัน) เท่ากับ 15.54 และ 27.84 RVU ตามลำดับ

แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีความหนืดทันทีเมื่อละลายในน้ำ ความหนืดเริ่มต้นของแป้ง HA-CL-GCWSS สูงกว่าความหนืดสูงสุดของแป้ง HA-CL ขณะที่ แป้ง LA-CL-GCWSS มีความหนืดเริ่มต้น ต่ำกว่าแป้ง LA-CL ทั้งนี้เนื่องจาก แป้งอาจพองตัวไม่เต็มที่ (ค่า %CWS เท่ากับ 72.60) เมื่อกวนด้วยความเร็วคงที่ 160 รอบต่อนาที และเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 องศาเซลเซียส ความหนืดค่อนข้างคงที่ตลอดการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส และรักษาระดับอุณหภูมินี้ไว้นาน 2 นาที พร้อม ๆ กับกวนอย่างต่อเนื่อง ความหนืดสุดท้ายของแป้ง HA-CL-GCWSS จะใกล้เคียงกับแป้ง HA-CL ขณะที่ แป้ง LA-CL-GCWSS มีความหนืดสุดท้ายต่ำกว่าแป้ง LA-CL



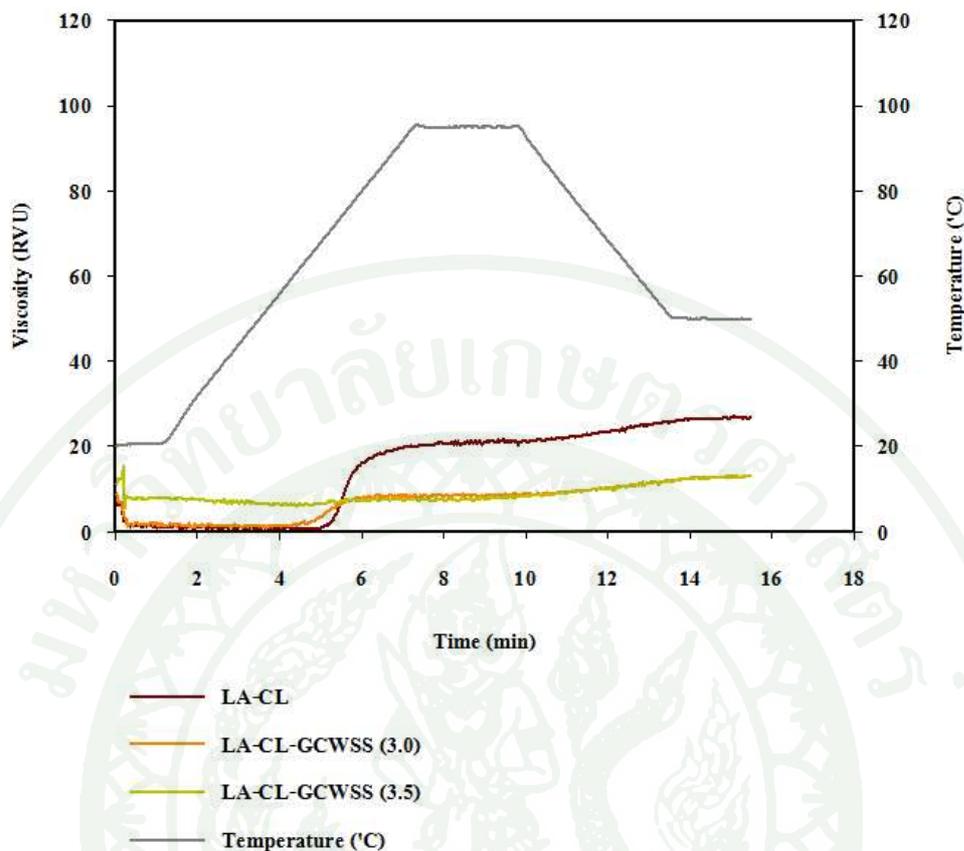
ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง HA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

หมายเหตุ: HA-CL คือ แป้งครอสลิงก์จากแป้งข้าวแอมิโลสสูง

HA-CL-GCWSS (10.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

HA-CL-GCWSS (11.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

HA-CL-GCWSS (12.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง



ภาพที่ 53 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

หมายเหตุ: LA-CL คือ แป้งครอสลิงค์จากแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ

LA-CL-GCWSS (3.0) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

LA-CL-GCWSS (3.5) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

ตารางที่ 20 สมบัติความหนืดของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่สภาวะการเตรียมต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลง ความหนืด (องศาเซลเซียส)	เวลาที่เกิดจุดสูงสุด ของความหนืด (นาที)	ความหนืด (RVU)		
				ความหนืดสูงสุด	ความหนืดสุดท้ายที่ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	ความหนืด สุดท้าย
HA-CL	10.0	n.d.	1.16±0.06 <sup>d</sup>	21.84±0.23 <sup>c</sup>	16.83±0.10 <sup>c</sup>	18.04±0.06 <sup>c</sup>
HA-CL	11.0	n.d.	1.30±0.00 <sup>cd</sup>	25.50±0.11 <sup>b</sup>	17.83±0.06 <sup>b</sup>	19.75±2.23 <sup>bc</sup>
HA-CL	12.0	n.d.	1.62±0.39 <sup>c</sup>	27.34±0.83 <sup>a</sup>	12.67±0.11 <sup>c</sup>	21.75±0.00 <sup>b</sup>
HA-CL	-	n.d.	9.50±0.03 <sup>a</sup>	15.54±0.30 <sup>c</sup>	15.25±0.06 <sup>d</sup>	15.54±0.41 <sup>d</sup>
LA-CL	3.0	n.d.	6.57±0.25 <sup>b</sup>	8.75±0.00 <sup>f</sup>	8.58±0.09 <sup>f</sup>	12.84±0.23 <sup>e</sup>
LA-CL	3.5	n.d.	1.05±0.05 <sup>d</sup>	8.09±0.12 <sup>f</sup>	8.25±0.07 <sup>g</sup>	13.88±.88 <sup>de</sup>
LA-CL	-	72.68±0.88	6.90±0.02 <sup>b</sup>	20.42±1.18 <sup>d</sup>	21.17±0.07 <sup>a</sup>	27.84±1.18 <sup>a</sup>

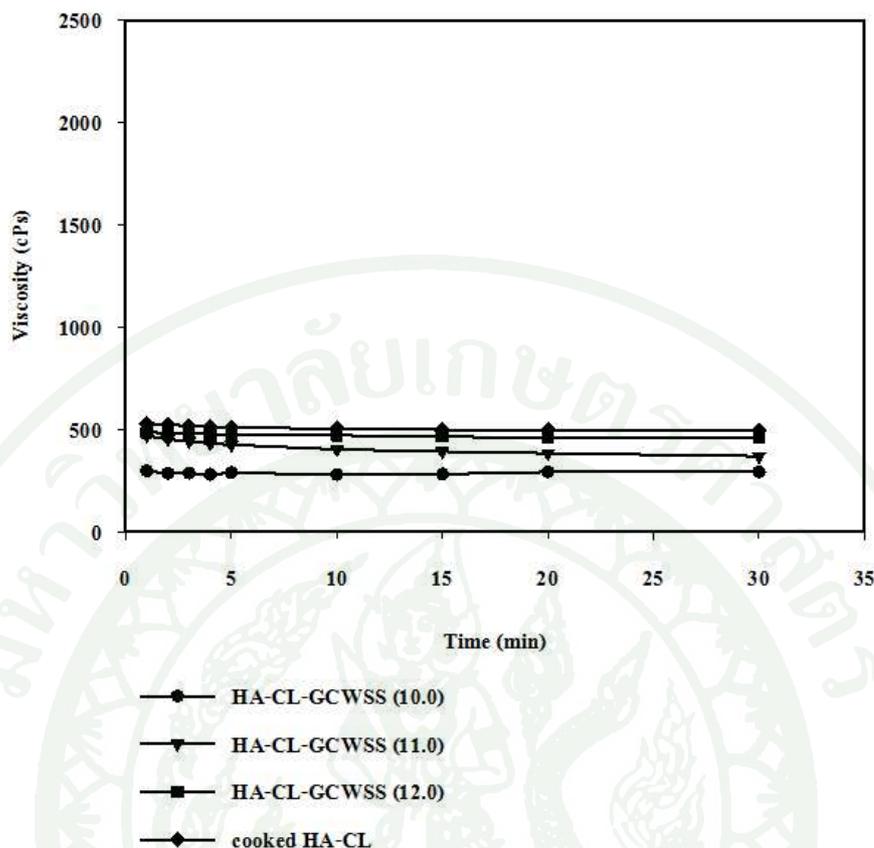
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

n.d. ไม่วิเคราะห์

### 3.8 ผลของความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วย Brookfield Viscometer

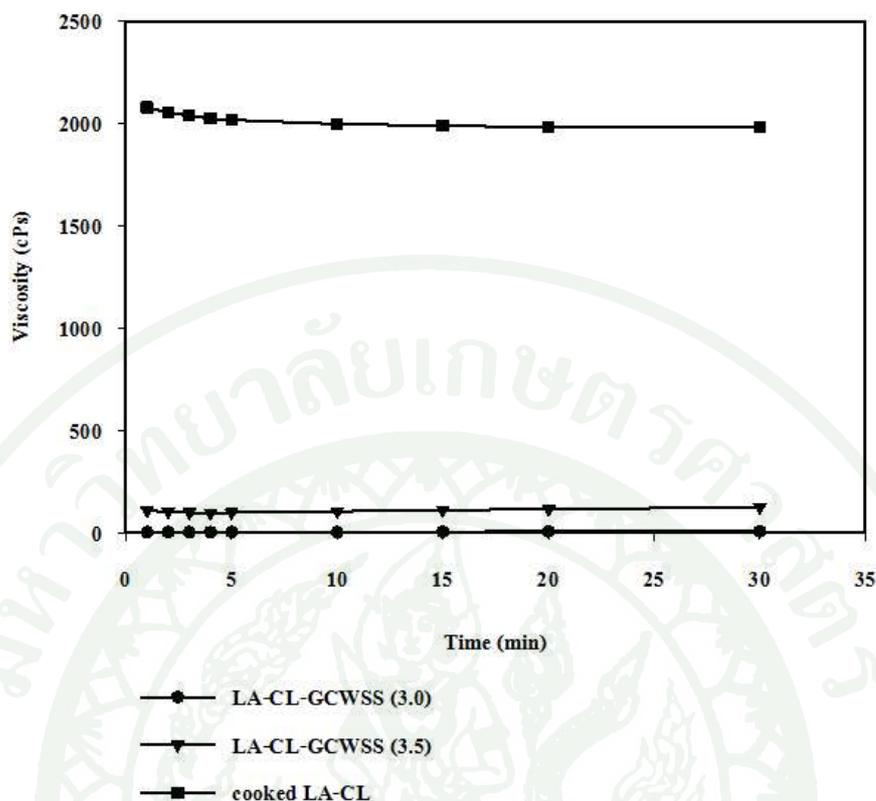
ลักษณะความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อกวนด้วยความเร็วคงที่ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยหัวเข็มหมายเลข 27 แสดงดังภาพที่ 54 และ 55 ตามลำดับ และตารางที่ 21 แป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณต่างในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS, LA-CL-GCWSS, HA-CL และ LA-CL ก่อนข้างคงที่เมื่อระยะเวลาในการกวนเพิ่มขึ้น

เมื่อเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 รอบต่อนาที แล้วย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยหัวเข็มหมายเลข 27 แก่แป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดแสดงดังภาพที่ 56 และ 57 ตามลำดับ และตารางที่ 22 โดยความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS จะลดลงเมื่อความเร็วในการกวนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมแบบ shear-thinning และเมื่อลดระดับความเร็วรอบลง ความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแป้งเปียก HA-CL และ LA-CL ทั้งนี้ ความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS, LA-CL-GCWSS, HA-CL และ LA-CL ก่อนข้างคงที่เมื่อมีการเพิ่มและลดอัตราเร็วในการกวนที่ระดับเดียวกัน



ภาพที่ 54 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

หมายเหตุ: HA-CL-GCWSS (10.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง  
 HA-CL-GCWSS (11.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง  
 HA-CL-GCWSS (12.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง  
 cooked HA-CL ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง HA-CL เข้มข้น ร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



ภาพที่ 55 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

หมายเหตุ: LA-CL-GCWSS (3.0) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

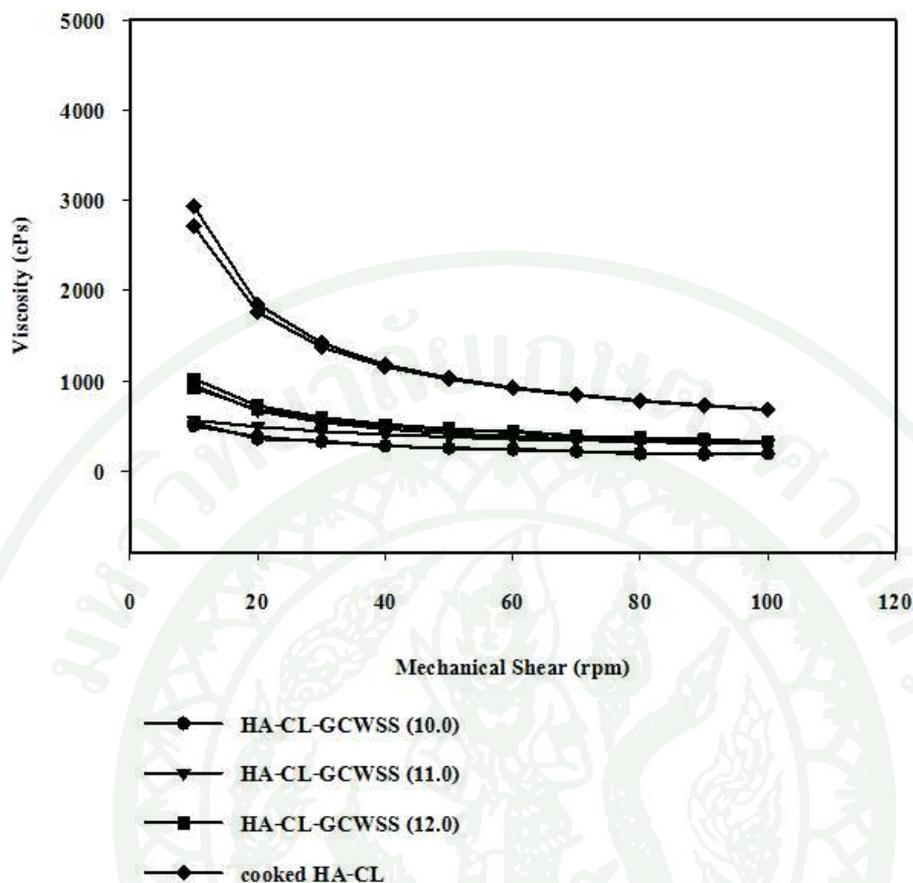
LA-CL-GCWSS (3.5) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

cooked LA-CL ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง LA-CL เข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

**ตารางที่ 21** การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็ม หมายเลข 27 ที่ความเร็ว 60 รอบ ต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

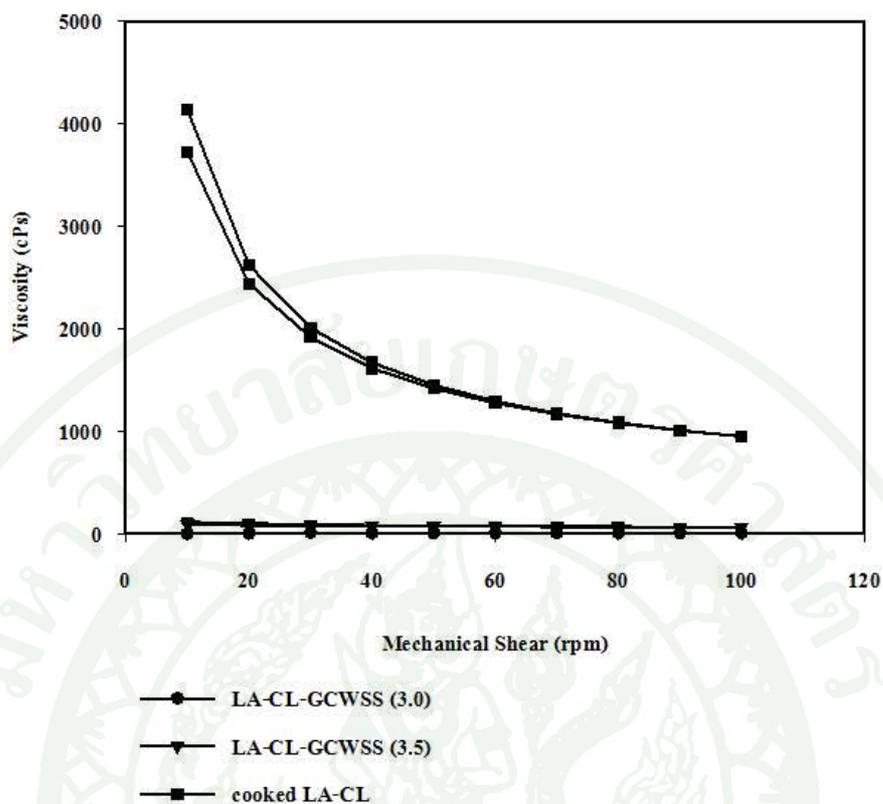
แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	ความหนืดเริ่มต้น (cPs)	ความหนืดสุดท้าย (cPs)
HA-CL	10.0	295.85±5.87 <sup>bc</sup>	291.70±0.00 <sup>bc</sup>
HA-CL	11.0	485.40±2.97 <sup>b</sup>	460.45±26.52 <sup>b</sup>
HA-CL	12.0	458.30±14.99 <sup>b</sup>	366.70±2.90 <sup>bc</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	0	529.15±5.87 <sup>b</sup>	497.90±14.71 <sup>b</sup>
LA-CL	3.0	4.02±0.21 <sup>d</sup>	8.25±1.50 <sup>d</sup>
LA-CL	3.5	108.35±11.18 <sup>cd</sup>	125.00±5.94 <sup>cd</sup>
แป้งเปียก <sup>1</sup>	-	2079.50±300.52 <sup>a</sup>	1983.50±300.50 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างควบคุมที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )



ภาพที่ 56 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: HA-CL-GCWSS (10.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง  
 HA-CL-GCWSS (11.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 11.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง  
 HA-CL-GCWSS (12.0) คือ แป้ง HA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง  
 cooked HA-CL ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง HA-CL เข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



ภาพที่ 57 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer หัวเข็มหมายเลข 27 โดยเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: LA-CL-GCWSS (3.0) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

LA-CL-GCWSS (3.5) คือ แป้ง LA-CL-GCWSS ที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง

cooked LA-CL ตัวอย่างที่เตรียมโดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้ง LA-CL เข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

**ตารางที่ 22** การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มระดับความเร็วในการกวนจาก 10 รอบต่อนาที เป็น 100 รอบต่อนาที และย้อนกลับด้วยความเร็วเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยหัวเข้หมายเลข 27

แป้ง	ปริมาณ 3 M NaOH (กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง)	ความหนืดเริ่มต้น (cPs)	ความหนืดสุดท้าย (cPs)
HA-CL	10.0	537.50±159.10 <sup>d</sup>	500.00±212.13 <sup>d</sup>
HA-CL	11.0	1025.00±35.36 <sup>c</sup>	925.00±35.36 <sup>c</sup>
HA-CL	12.0	950.00±0.00 <sup>c</sup>	562.50±17.68 <sup>d</sup>
HA-CL	0	2937.50±88.39 <sup>b</sup>	2712.50±88.39 <sup>b</sup>
LA-CL	3.0	0.00±0.00 <sup>e</sup>	0.00±0.00 <sup>e</sup>
LA-CL	3.5	112.50±17.68 <sup>c</sup>	110.40±14.71 <sup>c</sup>
LA-CL	-	4137.50±229.81 <sup>a</sup>	3725.00±282.84 <sup>a</sup>

**หมายเหตุ:** <sup>1</sup>แป้งเปียก เป็นตัวอย่างควบคุมที่เตรียม โดยให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

## สรุปผลการทดลอง

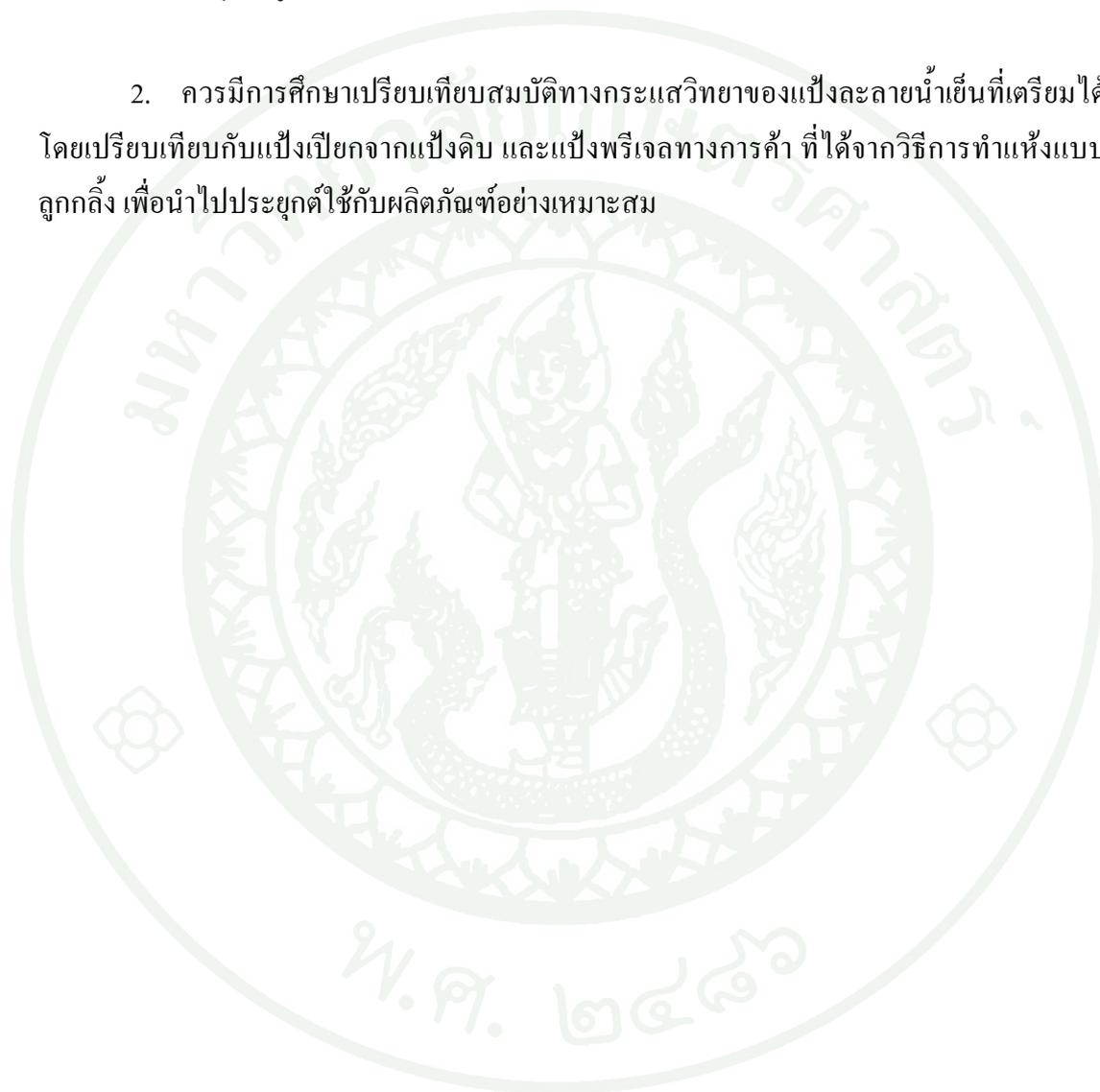
ในการเตรียมแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ด้วยวิธีการแขวนลอย แป้งในแอลกอฮอล์ร่วมกับค่าที่มีสัดส่วนของแป้งต่อสารละลายเอทานอล (ความเข้มข้นร้อยละ 40 สำหรับแป้ง HA และ MA และความเข้มข้นร้อยละ 95 สำหรับแป้ง LA) เป็น 1:20 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และปรับสภาพด้วย 3 M NaOH ที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส โดยมีการแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH ดังนี้ การเตรียมแป้ง HA-GCWSS จะแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเตรียมแป้ง MA-GCWSS จะแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 2.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และการเตรียมแป้ง LA-GCWSS จะแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0, 4.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ได้แป้งที่มีค่า %CWS มากกว่า 95 เมื่อเตรียมแป้ง HA-GCWSS โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แป้ง MA-GCWSS โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 2.5 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และแป้ง LA-GCWSS โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 และ 3.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (การเตรียมแป้ง LA-GCWSS โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แป้งเกิดเจลาติ-ไนเซชัน และไม่คงลักษณะความเป็นเม็ด) แป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ที่ได้มีปริมาณแก้ว และแอมิโลสสูงกว่าแป้งดิบเล็กน้อย เม็ดแป้งสูญเสีย birefringence และเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน มีรูปร่างต่างจากแป้งดิบ แป้ง HA-GCWSS และ MA-GCWSS มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ขณะที่แป้ง LA-GCWSS มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบบอสัญฐาน จึงทำให้แป้งละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ต่างจากแป้งดิบที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A โดยเมื่อนำแป้ง HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS มาละลายน้ำ จะให้ค่าการละลาย กำลังการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ใกล้เคียงกับแป้งเปียกของแป้งข้าวชนิดเดียวกันที่ได้จากการต้ม พลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของ HA-GCWSS มีค่าน้อยมาก และไม่ปรากฏฟิสิกในแป้ง MA-GCWSS และ LA-GCWSS ทั้งนี้ แป้งละลายน้ำเย็นจะมีสมบัติการเกิดโทรเกรเดชันใกล้เคียงกับแป้งดิบ เมื่อวิเคราะห์ความหนืดของแป้งเปียก HA-GCWSS, MA-GCWSS และ LA-GCWSS ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer พบว่า มีความหนืดเริ่มต้นสูงกว่าหรือใกล้เคียงความหนืดสูงสุดของแป้งดิบ ขณะที่เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมความ

หนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer พบว่าเกิด shear thinning เช่นเดียวกับแป้งเปียกของแป้งดิบ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลงขณะแรงเฉือนคงที่ ยกเว้น แป้ง HA-GCWSS ที่มีความหนืดค่อนข้างคงที่

เมื่อนำแป้ง HA-CL และ LA-CL มาเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นด้วยวิธีการแขวนลอยแป้งใน แอลกอฮอล์ร่วมกับด่าง ที่สัดส่วนของแป้งต่อสารละลายเอทานอลเป็น 1:20 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง (ใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 และ 95 ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยการเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS จะแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 10.0, 11.0 และ 12.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง และการเตรียมแป้ง LA-CL-GCWSS จะแปรสัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.0, 3.5 และ 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ที่เตรียมได้มีค่า %CWS มากกว่า 70 เมื่อเตรียมแป้ง HA-CL-GCWSS โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH ทั้ง 3 สภาวะ และ แป้ง LA-CL-GCWSS โดยใช้สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 3.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง (ที่สัดส่วนของ 3 M NaOH เป็น 4.0 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง แป้ง LA-CL เกิดเจลาตินในเซชัน และไม่คงลักษณะความเป็นเม็ด) โดยมีปริมาณเถ้า และแอมิโลสสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับแป้งโครอสลิงค์จากแป้งข้าวชนิดเดียวกัน เม็ดแป้งสูญเสีย birefringence และเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน มีรูปร่างต่างจากแป้งโครอสลิงค์ แป้ง HA-CL-GCWSS มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ขณะที่ แป้ง LA-CL-GCWSS มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบอัญฐาน จึงทำให้แป้งละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ต่างจากแป้งโครอสลิงค์ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A โดยเมื่อนำแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มาละลายน้ำ จะให้ค่าการละลาย กำล้างการพองตัว และสัดส่วนปริมาตรของ dispersed phase ใกล้เคียงกับแป้งเปียกจากแป้งโครอสลิงค์ของแป้งข้าวชนิดเดียวกันที่ได้จากการต้มพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกของแป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-GCWSS มีค่าน้อยมาก ทั้งนี้ แป้ง HA-CL-GCWSS และ LA-GCWSS มีการเกิดรีโทรเกรเดชันใกล้เคียงกับแป้งโครอสลิงค์ เมื่อวิเคราะห์แป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer พบว่า มีความหนืดเริ่มต้นทันที โดยแป้ง HA-CL-GCWSS มีค่าสูงกว่าหรือใกล้เคียงความหนืดสูงสุดของแป้ง โครอสลิงค์ ขณะที่ แป้ง LA-CL-GCWSS มีค่าต่ำกว่าความหนืดสูงสุดของแป้งโครอสลิงค์ อันเนื่องมาจากมีค่า %CWS ต่ำ และมีความหนืดค่อนข้างคงที่ตลอดกระบวนการวิเคราะห์ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer พบว่า แป้งเปียก HA-CL-GCWSS และ LA-CL-GCWSS มีความหนืดค่อนข้างคงที่

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมแป้งละลายน้ำเย็นจากแป้ง HA-CL และ LA-CL เพื่อให้ได้ค่า %CWS เพิ่มขึ้น ควรเพิ่มอุณหภูมิในการเตรียมจาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 30 หรือ 35 องศาเซลเซียส
2. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกระแสวิทยาของแป้งละลายน้ำเย็นที่เตรียมได้ โดยเปรียบเทียบกับแป้งเปียกจากแป้งดิบ และแป้งพรีเจลทางการค้า ที่ได้จากวิธีการทำแห้งแบบ ลูกกลิ้ง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2516. มาตรฐานสหภาพกรรม  
ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง: เอกสาร มอก. ที่ 52-2516. กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แปงัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร: เอกสาร มอก. ที่  
1073-2535. กรุงเทพฯ.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุลปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,  
กรุงเทพฯ.

ดวงใจ ถิ่นธรรมถาวร. 2536. การตัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังแบบครอสลิงกิง. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญทิวา นิลจันทร์. 2548. การศึกษาสมบัติเคมีฟิสิกส์ของฟลาวและสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์ต่าง ๆ  
ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรรณอร ว่องสนั่นศิลป์ และพจน์ กุลวานิช. 2552. การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยการแทนที่  
ด้วยกลุ่มไฮดรอกซีโพรพิล, การเชื่อมขวางด้วยฟอสเฟต และพรีเจลาติไนเซชันเพื่อใช้  
ประโยชน์ทางเภสัชกรรม, น. 463-467. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหา  
วิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ครั้งที่ 7 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร).  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รุ่งทิวา วันสุขศรี. 2543. การสกัดโปรตีนในปลายข้าวหอมมะลิเพื่อทำแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์. วิทยา  
นิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรรณพร ศิริโรจน์. 2528. การปรับปรุงคุณภาพของแป้งมันสำปะหลังโดยการแปรสภาพทาง  
เคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Anonymous. 2008. **Cybercolloids Photograph Library**. Available Source:

[www.cybercolloids.net/photos/search.php](http://www.cybercolloids.net/photos/search.php). December 14, 2009.

A.O.A.C. 1990. **Official Method of Analytical Of the Association of Official Analytical Chemist 15th ed.** The Association of Official Analytical Chemists. Inc. U.S.A.

\_\_\_\_\_. 1992. **Official Method of Analytical Of the Association of Official Analytical Chemist 15th ed.** The Association of Official Analytical Chemists. Inc. U.S.A.

Bello-Pérez, L.A., R. Romero-Manilla and O. Paredes-López. 2000. Preparation and Properties of Physically Modified Banana Starch Prepared by Alcoholic-Alkaline Treatment. **Starch/Stärke**. 52: 154-159.

BeMiller, J.N. 1997. Starch modification : challenges and prospects. **Starch/Stärke**. 49: 127 – 131.

Biliaderis, C.G. 1998. Structures and phase transitions of starch polymers, pp. 57-168. In R.H. Walter, ed. **Polysaccharide Association Structures in Food**. Marcel Dekker, Inc., New York.

Blanshard, J.M.V. 1987. **Starch granule structure and function: A physicochemical approach**. In T. Gailliard (Ed.). Starch: Properties and Potential. John Wiley and Sons., New York.

Boettger, M. 1963. Recent study show the effect of pregelatinized starches on cake quality. **Cereal Sci. Today**. 8: 106-108.

- Bogracheva, T.Y., V.J. Morris, S.G. Ring and C.L. Hedley. 1998. The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization. **Biopolymers**. 45: 323-332.
- Buléon, A., P. Colonna, V. Planchot and S. Ball. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. **Int. J. Biol. Macromolecules** 23: 85-112.
- Chen, J. and J. Jane. 1994a. Preparation of Granular Cold-Water-Soluble Starches by Alcoholic-Alkaline Treatment. **Cereal Chem.** 71(6): 618-622.
- \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 1994b. Properties of Granular Cold-Water-Soluble Starch Prepared by Alcoholic-Alkaline Treatments. **Cereal Chem.** 71(6): 623-626.
- Dayane R. I., B. D. Junior. C. W. I. Haminiuk, M. R. Sierakowski, R. J. S. de Freitas and A. de P. Scheer. 2007. Granules morphology and rheological behavior of green banana (*Musa cavendishii*) and corn (*Zea mays*) starch gels. **Ci nc. agrotec.** 31(5); 1143-1148.
- Eastman, J.E. 1987. Cold Water Swelling Starch Composition. **U.S. patent 6,634,596.**
- \_\_\_\_\_ and C.O. Moore. 1984. Cold Water Soluble Granular Starch for Gelled Food Composition. **U.S. patent 4,465,702.**
- Franco, C.M.L., S.J.R. Preto, C.F. Ciacco and B. Geraldo. 1992. Factors that affect the enzymatic degradation of natural starch granules-effect of the size of the granules. **Starch/Stärke**. 44: 422-426.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and D.Q. Tavares. 1998. The structure of waxy corn starch effect of granule size. **Starch/Stärke**. 50: 193-198.
- French, D. 1979. Fine structure of starch and its relation to the organization of starch granule. **Denpun Kagaku**. 19: 8.

- Gallant, D.J., B. Bouchet, A. Buleon and S. Perez. 1992. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzyme degradation. **Eur. J. Clin. Nutri.** 46: S3-S16.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and P.M. Baldwin. 1997. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. **Carbohydr. Polym.** 32: 177-191.
- Gardiner, D.S. 1975. Dessert Composition. **British patent 1,419,996.**
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance. **Carbohydrates Res.** 147: 342.
- Imeson, A. 1992. **Thickening and Gelling Agents for Food.** 258 P. Blackie Academic & Propesional, Bishopbriggs., Glasgow.
- Iturriaga, L., B. Lopez and M. Añon. 2004. Thermal and physicochemical characterization of seven argentine rice flours and starches. **Food Res. Int.** 37: 439-447.
- Jane, J. and P.A. Seib. 1991. Preparation of Granular Cold Water Swelling/Soluble Starches by Alcoholic-Alkaline Treatment. **U.S. patent 5,057,157.**
- \_\_\_\_\_, S.A.S. Craig, P.A. Seib and R.C. Hosney. 1986. Characterization of Granular Cold Water-Soluble Starch. **Starch/Stärke.** 38(8): 258-263.
- Juliano, B. O. 1971. A simplified assay for milled rice amylose. **Cereal Science today.** 16(10): 334-338.
- \_\_\_\_\_. 1972. **Rice Chemistry and Technology.** 98 P. American Association of Cereal Chemistry Inc., Minnsota.

- \_\_\_\_\_. 1984. **Rice starch: Production, properties and uses**. Pages 507-528 . *In* Starch Chemistry and Technology, 2 nd ed. R.L. Whistler, J.N. Bemiller, and E.F. Paschall, eds. Academic Press, Orlando, FL.
- \_\_\_\_\_. 1985. Rice properties and processing. **Food Reviews International**. 1(3): 432-445.
- Kaur, B., A. Fazilah and A. Karim. 2010. Alcoholic-alkaline treatment of sago starch and its effect on physicochemical properties. **Food Bioprod Precess**. ARTICLE IN PRESS FBP-187; No. of Pages 9.
- Keer, R.W. and F.C. Cleveland. 1957. Process for the preparation of distarch phosphate and the resulting product. **U.S. patent 2,801,242**.
- Kirby, K.W. 1986. **Textile industry**. 229-252 P. *In* O.B. Wurzburg (Ed.). Modified starch: Properties and Uses. CRC Press Inc., Florida.
- Knight, J.W. 1969. **The Starch Industry**. 189 P. Pergamon Press Ltd., Oxford.
- Kugimiya, M., J. W. Donovan and R. y. Wong. 1980. Phase transitions of amylase-lipid complexed in starches: A calorimetric study. **Stärke**. 32: 265.
- Leach, H.W., McCowen, L.D., and Schoch, T.J. 1959. Structure of the starch granule. I. Swelling And solubility pattern of various starches. **Cereal Chem**. 36: 534-544.
- Ligt, J.M. 1990. Modified food starches: why, what, where and how. **Cereal Foods World**. 35(11): 1081 – 1092.
- Manners, D.J. 1989. Recent developments in our understanding of amylopectin structure. **Carbohydr Polym**. 11: 87-112.

- Mitrevej, A. 1996. Pharmaceuticals and high value from starch. *In* **Advanced Post-Academic Course on Tapioca Starch Technology (I)**. January 22-26 & February 19-23, 1996. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Morison, W.R., R.F. Tester and M.J. Gidley. 1994. Properties of damaged starch granules II. crystallinity, molecular order and gelatinization of ball-milled starches. **J. Cereal Sci.** 19: 209-217.
- Mutsuo, T., Y. Futsuhara, F. Kikuchi and H. Yamaguchi. 1997. **Science of the Rice Plant, Vol III**. 469 P. Nosan Gyoson Banka Kyokai (Nobunkyo), Tokyo.
- Nabesima, E.H. and M.V.E. Grossmann. 2001. Functional properties of pregelatinized and cross-lined cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. **Carbohydrate polymers.** 45: 347-353.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual of the Series 4 Rapid Visco Analyzer**. 93 P. Australia.
- Powell, E.L. 1967. Production and use of pregelatinized starch. pp. 523-536. *In* R.L. Whistler and E.F. Paschall., eds. **Starch: Chemistry and Technology Vol. II**. Academic Press Inc., New York.
- Quan, Y., M.R. Kweon and F.W. Sosulski. 1997. Effect of crosslinking on functional properties of cationic corn starch. **Starch/Stärke.** 49(11): 458-464.
- Rajagopalan, S. and P.A. Seib. 1992. Granular cold-water-soluble starches prepared at atmospheric pressure. **J. Cereal Sci.** 16: 29-40.

- Robin, J.P., C. Mercier, R. Charbonniere and J.A. Builbot. 1974. Lintnerized starches, gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. **Cereal Chem.** 51: 389-406.
- Rutenberg, M. W. 1980. **Starch and its modifications.** Chapter 22 in: Handbook of Water-Soluble Gums and Resins. Robert L. Davidson, ed. McGraw Hill: New York.
- \_\_\_\_\_. and D. Solarek. 1984. **Starch derivatives: technology and uses.** pp. 311-388. In R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall., eds. Starch: Chemistry and Technology. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press Inc., Florida.
- Sanchez T., D. Dufour, I.X. Moreno and H. Ceballos. 2010. Comparison of Pasting and Gel Stabilities of Waxy and Normal Starches from Potato, Maize, and Rice with Those of a Novel Waxy Cassava Starch under Thermal, Chemical, and Mechanical Stress. **J. Agric. Food Chem.** 58(8): 5093–5099.
- Sanders, J.P.M. 1996. Starch manufacturing in the word. *In* **Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology.** Jan. 22 – 26 & Feb. 19 – 23, 1996. AIT Center, Bangkok.
- Sawai, H. and Y. Morita. 1968. Studies on rice glutelin. Part I. Isolation and purification of glutelin from rice endosperm. **Arg. Biol. Chem.** 32(1): 76-80
- Senda, A. 1991. Premix Preparation for Ice Foods. **U.S. patent 5,006,359.**
- Shelton, D.R. and W.J. Lee.. 2000. **Cereal carbohydrate- handbook of cereal science and technology 2nd edition.** 415 P. Karel J. and Ponte J.R. Marcel Dekkers, Inc., New York.
- Singh, J. and N. Singh. 2003. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. **Food Hydrocolloids.** 17: 63-72.

- Smith, R.J. 1979. **Food Carbohydrate**. The AVI Publishing Co., Westport, Connecticut. 416 P.
- Sriroth, K., V. Santisopasri, C. Petchalanuwat, K. Kurotjanawong, K. Piyachomkwan and C.G. Oates. 1999. Cassava starch granule structure-function properties: influence of time and conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. **Carbohydr. Polym.** 38(2): 161-171.
- Svensson, E. and A.C. Eliasson. 1995. Crystalline changes in native wheat and potato starches at intermediate water levels during gelatinization. **Carbohydr. Polym.** 26: 171-176.
- Swinkels, J.J.M. 1985. Sources of starch, its chemistry and physics. *In* G.M.A. van Beynum and J.A. Roels., eds. **Starch conversion Technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Thomas, D.J. and W.A. Atwell. 1999. **Starches**. American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota.
- Tutenberg, M.W. and D. Solarek. 1984. **Starch derivatives: technology and uses**. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall (Eds.). **Starch: Chemistry and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed.
- Walker, D.A. 1976. **Preparation of geological samples for scanning electron microscopy**. 68 P. Cited by A. Delokkunanund. Specimen Preparation for SEM Kasetsart University, Bangkok.
- Winton, A.L. and K.B. Winton. 1906. **The Structure and Composition of Foods**. 673 P. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Woo, K. and P. A. Seib. 1997. Cross-linking of wheat starch and hydroxypropylated wheat starch in alkaline slurry with sodium trimetaphosphate. **Carbohydrate Polymers**. 33: 263-271.

Wurzburg, O.B. 1986. **Modified starches: Properties and Uses**. 277 P. CRC Press Inc., Florida.

Zobel, H.F. 1988. Molecules to granules: A comprehensive review. **Starch/Stärke**. 40: 1-7.

\_\_\_\_\_. 1984. **Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes**, pp. 285-309. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall., eds. **Starch: Chemical and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, Inc., New York.

Zuber, M.S. 1965. **Genetic control of starch development**. *In* R.L. Whistler and E.F. Paschall., eds. **Starch : Chemistry and Technology Vol. I**. Academic Press, New York.



ภาคผนวก

## 1. การวัดค่าความชื้น (AOAC, 1992)

ชั่งตัวอย่างในจานอลูมิเนียมให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัม อบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105-107 องศาเซลเซียส นานประมาณ 5 ชั่วโมง นำออกมาใส่ในเคสิคเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(w_1 - w_2) \times 100}{w_1}$$

เมื่อ  $w_1$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ

$w_2$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ

## 2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1990)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ( $w$ ) บนกระดาษกรอง และห่อให้มิดชิด จากนั้นนำมาใส่ลงในทิมเบิล และนำทิมเบิลใส่ใน 1045 Extraction units ซึ่งเชื่อมต่อกับ 1046 Service unit โดยใช้ adapter เดิมตัวทำละลายปริมาตร 45 มิลลิลิตร ลงในถ้วยไขมันซึ่งอบและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ( $w_1$ ) แล้วจึงนำถ้วยไขมันเข้าไปใน Soxtec System HT2 1045 Extraction unit พร้อมทั้งเคลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง boiling สักเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเคลื่อนคันโยกมาที่ตำแหน่ง rising ทำการ rising เป็นเวลา 45 นาที จึงนำถ้วยไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปล่อยให้ถ้วยไขมันให้เย็นในเคสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก ( $w_2$ ) แล้วคำนวณร้อยละไขมัน

$$\text{ไขมัน (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(w_2 - w_1) \times 100}{w}$$

เมื่อ  $w$  คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง เป็นกรัม

$w_1$  คือ น้ำหนักแห้งของถ้วยไขมันและตัวอย่างก่อนอบ เป็นกรัม

$w_2$  คือ น้ำหนักแห้งของถ้วยไขมันและตัวอย่างหลังอบ เป็นกรัม

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1990)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม (ขึ้นกับปริมาณโปรตีนที่มีในตัวอย่าง) ใส่ลงในหลอดแก้วเซคาลห์ จากนั้นใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 7 กรัม และเติมกรดซัลฟูริกปริมาตร 15 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบา ๆ วางหลอดบนเครื่องย่อยในตู้ควัน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที จนกระทั่งได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วจึงนำไปเข้าเครื่องกลั่น โดยเครื่องนี้ต่อท่อให้ปลายจุ่มในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เพื่อเก็บแอมโมเนียม ใช้เวลาในการกลั่นนานประมาณ 5 นาที แล้วนำไปไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาร้อยละของไนโตรเจน

$$\text{ไนโตรเจน (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(S - B) \times N \times 1.401}{w}$$

$$\text{โปรตีน (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \text{ไนโตรเจน (ร้อยละของน้ำหนัก)} \times 5.95$$

เมื่อ S คือ ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตสารเบลงค์ (มิลลิลิตร)

N คือ นอร์มัลลิตีของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก

w คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

### 4. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 1990)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในจานกระเบื้องเคลือบที่เผาและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว นำไปเผาด้วยไฟอ่อนจนหมดควัน แล้วนำไปเผาต่อในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $600 \pm 20$  องศาเซลเซียส นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือสีเทา จากนั้นจึงนำออกมาใส่เดสิคเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่ง เเผตัวอย่างซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม ถือเป็นน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องเคลือบและตัวอย่างหลังเผาจนได้น้ำหนักคงที่

$$\text{ปริมาณเก่า (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(w_1 - w_2) \times 100}{(w_1 - w)}$$

เมื่อ  $w$  คือ น้ำหนักของงานกระเบื้องเคลือบ เป็นกรัม

$w_1$  คือ น้ำหนักของงานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างก่อนเผา เป็นกรัม

$w_2$  คือ น้ำหนักของงานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างหลังเผาจนได้น้ำหนักคงที่เป็น  
กรัม

## 5. การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมไนเตรตของอียิปต์ (Polarimetric method: The European Economic Community)

### 5.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตามวิธีการของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2516) เตรียมตัวอย่างโดย  
ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ถ้าผ่านไม่ได้ต้องนำมาบดก่อนการวิเคราะห์

### 5.2 การวิเคราะห์หาโททัลโรตาทอรีเพาเวอร์ (total rotatory power, P)

5.2.1 ชั่งตัวอย่างจำนวน 5.000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร โดย  
ผ่านทางกรวยแก้วซึ่งวางบนปากขวด

5.2.2 เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.3094 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าขวดปรับ  
ปริมาตรเพื่อให้ตัวอย่างเปียกชุ่มจนทั่วกัน

5.2.3 เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.3094 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร อีกครั้ง แล้วจึงจุ่ม  
ขวดแก้วพร้อมทั้งกรวยลงในอ่างน้ำเดือด เขย่าขวดปรับปริมาตรโดยหมุนแรง ๆ อย่างสม่ำเสมอเป็น  
เวลานาน 3 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเกาะกันเป็นก้อน ระหว่างที่เขย่าขวดปรับปริมาตร  
จะต้องแช่อยู่ในน้ำเดือด

5.2.4 แช่ขวดปรับปริมาตรไว้ในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 15 นาที น้ำในอ่างต้องมีมาก  
พอ และเดือดอยู่ตลอดเวลาที่แช่ขวดแก้ว

5.2.5 ยกขวดปรับปริมาตรออกจากรุ่นน้ำเดือด แล้วจึงเติมน้ำเย็นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร แล้วทำให้ขวดปรับปริมาตรซึ่งมีสารละลายตัวอย่างเย็นลงทันทีถึงอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

5.2.6 เติมสารละลายซิงค์ซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 40 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และสารละลายโปรตเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์เข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรพร้อมกับเขย่าแรง ๆ

5.2.7 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แล้วจึงเขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

5.2.8 กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 โดยทิ้งสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ 25 มิลลิลิตรแรก สำหรับสารละลายที่กรองได้จึงนำไปใส่ในหลอดสแตนเลสยาว 10 เซนติเมตรของเครื่องโพลาริมิเตอร์

5.2.9 อ่านค่า total rotary power (P) เป็น angular degree ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

### 5.3 การวิเคราะห์หาโรทาทอรีเพาเวอร์ของสารละลายในน้ำ หลังจากทำปฏิกิริยากับกรดแล้ว (P')

5.3.1 ชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 12.500 กรัม ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

5.3.2 เติมน้ำกลั่นประมาณ 200 มิลลิลิตร เขย่าขวดปรับปริมาตรเพื่อให้ตัวอย่างเปียกชุ่มจนทั่วกัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง พร้อมกับเขย่าเป็นระยะ ๆ ประมาณ 6 ครั้ง แล้วเติมน้ำให้ครบ 250 มิลลิลิตร เขย่าอีกให้เป็นเนื้อเดียวกัน

5.3.3 ตั้งทิ้งไว้ให้แบ่งตกตะกอน แล้วกรองให้ได้สารละลายใสด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 (ทดสอบสารละลายที่กรองได้ว่าไม่มีแป้งปนออกมาโดยแบ่งสารละลายมา 2 มิลลิลิตร หยดสารละลายไอโอดีนเจือจางลงไป 1 หยด โดยสารละลายที่นำมาทดสอบจะต้องไม่มีสีน้ำเงินเกิดขึ้น)

5.3.4 ใช้ปิเปตดูดสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 25 ของน้ำหนัก ปริมาตร 4.2 มิลลิลิตร เขย่าแรง ๆ วางกรวยแก้วบนปากขวดแล้วจุ่มในอ่างน้ำเดือดเช่นเดียวกับ P นาน 15 นาที

5.3.5 ทำเช่นเดียวกับข้อ 5.2.4-5.2.9 แล้วคำนวณหาปริมาณแป้งเป็นร้อยละของน้ำหนักเมื่ออบแห้ง ตามสูตร

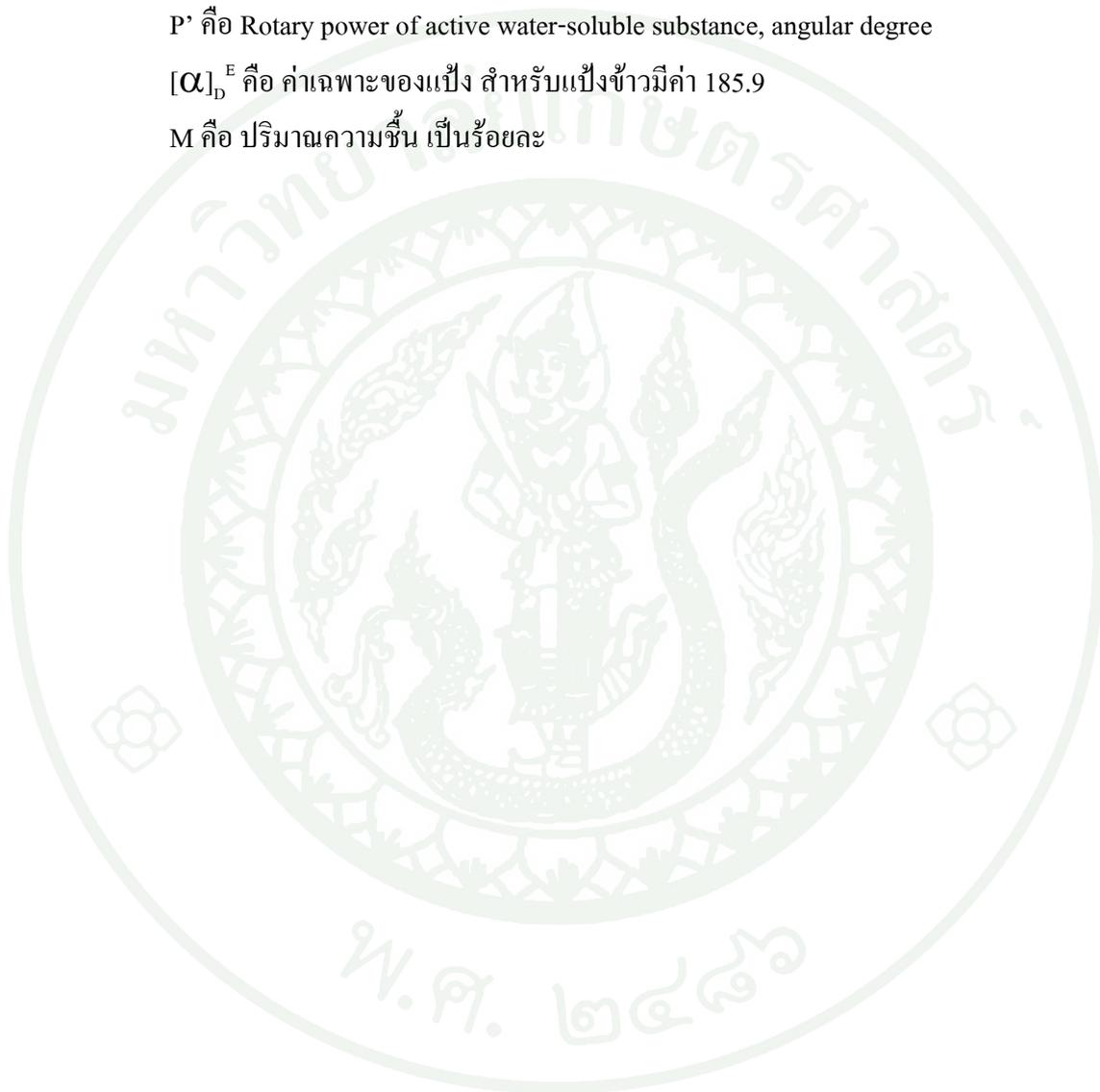
$$\text{ปริมาณแป้ง (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{2000(P-P') \times 100 \times 2}{[\alpha]_D^E \times (100-M)}$$

เมื่อ P คือ Total rotary power, angular degree

P' คือ Rotary power of active water-soluble substance, angular degree

$[\alpha]_D^E$  คือ ค่าเฉพาะของแป้ง สำหรับแป้งข้าวมีค่า 185.9

M คือ ปริมาณความชื้น เป็นร้อยละ



## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวโรสลาวาตี โตะแอ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	16 สิงหาคม พ.ศ. 2522
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2543)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนา ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และทุนอุดหนุน โครงการวิจัยมหาวิทยาลัยมหาวิทาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์