



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)

ปริญญา

เทคโนโลยีชีวภาพ

เทคโนโลยีชีวภาพ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

สมบัติโครงสร้างและเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่างๆ และการใช้ประโยชน์
เป็นสารปรับปรุงเจลของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด

Structural and Physico-chemical Properties of Various Starches and Their
Roles as Gelling Improvers in Blends with Acid-thinned Cassava Starch

นามผู้วิจัย นางสาวศิริธร เลิศพานิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์กล้าณรงค์ ศรีรอด, D.Ing.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติโครงสร้างและเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่างๆ และการใช้ประโยชน์
เป็นสารปรับปรุงเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด

Structural and Physico-chemical Properties of Various Starches and Their Roles
as Gelling Improvers in Blends with Acid-thinned Cassava Starch

โดย

นางสาวศิริธร เลิศพานิช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศิริธร เลิศพานิช 2556: สมบัติโครงสร้างและเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่างๆ และการใช้ประโยชน์
เป็นสารปรับปรุงเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์กล้าณรงค์ ศรีรอด, D.Ing. 147 หน้า

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่างๆ ที่มีการใช้ประโยชน์อยู่น้อย (มันแกว ผือก เอนซีท กระจับ ถั่วหัวช้าง และ ถั่วเขียว) เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการทำแป้งผสม พบว่าแป้งดังกล่าวมีความบริสุทธิ์ (ปริมาณโปรตีนและเถ้าน้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแห้ง) เมื่อตรวจสอบขนาดของเม็ดแป้งพบว่าแป้งผือกมีขนาดเม็ดแป้งเล็กที่สุด (2 ไมโครเมตร) และแป้งเอนซีทมีขนาดเม็ดแป้งใหญ่ที่สุด (42 ไมโครเมตร) โดยมีรูปแบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B แป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วหัวช้างจัดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ C ในขณะที่แป้งที่เหลือมีโครงสร้างผลึกแบบ A การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 7.91 ซึ่งพบในแป้งผือกจนถึงร้อยละ 35.59 ซึ่งพบในแป้งถั่วหัวช้าง เมื่อทำการตรวจวัดค่าการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทิน พบว่าแป้งถั่วหัวช้างมีสายโซ่ขนาดยาว ($DP \geq 37$) มากที่สุด (ร้อยละ 11.88) และมีสายโซ่ขนาดสั้น ($DP 6-12$) น้อยที่สุด (ร้อยละ 19.35) นอกจากนี้การศึกษาคูณสมบัติเชิงความร้อน ความหนืด และรีโอโลยีของแป้งพบว่าความหนืดของแป้งเปียกเมื่อตรวจสอบด้วย Rapid visco analyzer (RVA) ของแป้งกระจับ แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้างมีค่าการคืนตัวเป็นบวก แสดงว่ามีแนวโน้มในการเกิดเจลได้ดี นอกจากนี้แป้งถั่วหัวช้างมีอุณหภูมิเจลาที่ในเซชันต่ำที่สุดและมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาที่ในเซชันที่สูงที่สุด ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีค่าพลังงานในการหลอมผลึกและอุณหภูมิของแป้งรีโทรเกรดต่ำที่สุด จากการศึกษาสมบัติทางกลการไหล พบว่าค่า G' ขณะเย็นตัวของแป้งกระจับ แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้างมีค่าสูง ขณะที่แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันแกว และแป้งผือกมีค่าต่ำ เมื่อใช้เทคนิค Principal Component Analysis (PCA) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชนิดแป้งที่มีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเจล พบว่าสามารถจัดกลุ่มแป้งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีการเกิดเจลดี ได้แก่ แป้งถั่วหัวช้าง แป้งถั่วเขียว แป้งเอนซีท และแป้งกระจับ และกลุ่มที่มีคุณสมบัติการเกิดเจลไม่ดี ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันแกว และแป้งผือก การปรับปรุงสมบัติของแป้งมันสำปะหลังโดยการดัดแปรทางเคมีโดยการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นกรด (ร้อยละ 1-6 โดยน้ำหนัก) และเวลาการทำปฏิกิริยา (1-7 ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดมีค่าความหนืดขณะร้อนลดลง (ความหนืดมีค่า 4 ถึง 341 cP ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ 90 องศาเซลเซียส) แต่ค่าการไหลเทียบกับน้ำ (water fluidity, WF) เพิ่มขึ้น (WF มีค่า 8 ถึง 82) เมื่อตรวจสอบแป้งเปียกขณะเย็นด้วย RVA พบว่า มีค่าความหนืดสุดท้ายสูง (94-541 RVU) และเจลแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดมีค่าความแข็ง (8-152 กรัม) มากกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ (15 กรัม) ทั้งนี้สมบัติของแป้งดัดแปรที่ได้จะขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการผลิต เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งที่มีการเกิดเจลดี ได้แก่ แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง ที่อัตราส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75 พบว่าสมบัติรีโอโลยี ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลแป้งผสมดีขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับระดับของการดัดแปรแป้งด้วยกรดและสัดส่วนของแป้งที่เกิดเจลดีในสูตรแป้งผสม

Sirithorn Lertphanich 2013: Structural and Physico-chemical Properties of Various Starches and Their Roles as Gelling Improvers in Blends with Acid-thinned Cassava Starch. Doctor of Philosophy (Biotechnology), Major Field: Biotechnology, Department of Biotechnology. Thesis Advisor: Associate Professor Klanarong Sriroth, D.Ing. 147 pages.

The objective of this study were to characterize structural and functional properties of underutilized starches including yam bean, taro, ensete, water caltrop, chickpea and mungbean and compare with cassava starch in order to evaluate their potential uses as cassava gel improvers by blending technique. All extracted starches were pure (protein and ash < 0.5% dwb). Taro starch had the smallest granules (2 μm) while ensete granules were the largest (42 μm). Only ensete starch had the B-type polymorph, while mungbean and chickpea starches were C-type and the rest were A-type. The amylose contents varied from 7.91% in taro starch to 35.59% in chickpea starch. Chickpea had the highest proportion (11.88%) of long branch chains ($\text{DP} \geq 37$), and lowest proportion (19.35%) of short branch chain (DP 6-12). Diverse thermal, pasting, rheological properties and degree of enzyme hydrolysis were observed. Based on paste viscosity as determined by a Rapid Visco Analyzer (RVA), only water caltrop, mungbean and chickpea had positive values of setback from peak, implying high tendency of gelation. Chickpea had the lowest gelatinization temperature and the highest gelatinization range, whereas cassava starch showed the lowest enthalphy and transition temperature for retrograded starch. The dynamic rheological analysis also revealed high storage modulus (G') values upon cooling for water caltrop, mungbean and chickpea starches, while cassava, yam bean and taro had low G' values. By Principal Component Analysis (PCA) on gelation properties, starches were classified into two groups which are good gelling starches, i.e. chickpea, mungbean, ensete and water caltrop and inferior gelling starches, i.e. cassava, yam bean and taro. The acid modification by hydrochloric acid (1 to 6% dsb) for 1 to 7 hr at 45°C was then introduced to improve gelation properties of cassava starch. Hot paste of acid-thinned cassava starches had lower viscosity (viscosity = 4 to 341 cP at 10%dsb, 90°C) but higher water fluidity ($\text{WF} = 8$ to 82), while cold paste had high final viscosity by RVA (94–541 RVU) and gel hardness of acid-thinned cassava starch was much higher (8–152 g) than native cassava starch (15 g); the property changes were dependent on modification conditions. By blending acid-thinned cassava starch with good gelling starches, i.e. mungbean and chickpea (25, 50 and 75%), the texture of the blends were improved, the extent was influenced by degree of acid thinning and the amount of good gelling starches.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กล้าณรงค์ ศรีรอด อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร. เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้
กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำงานวิจัยและการศึกษา และ รองศาสตราจารย์ ดร. วิรัตน์
วาณิชศรีรัตน ประธานการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรารัตน์ อนันตกุล ผู้ทรงคุณวุฒิ
ภายนอกที่กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนส่วนหนึ่ง จากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยี
ชีวภาพเกษตร สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและการวิจัยสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง
หน่วยงานเครือข่ายศูนย์พันธุ์วิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ และสถาบันพัฒนา
ผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่
อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัยให้ดำเนินการไปด้วยดี ตลอดจนเพื่อน พี่และน้องใน
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพที่ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวทุกๆ คน และผู้มีพระคุณที่ได้ให้กำลังใจ
ช่วยเหลือสนับสนุนอย่างดียิ่ง

ศิริธร เลิศพานิช

กันยายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	43
สรุปผลการทดลอง	115
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	117
ภาคผนวก	128
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์	129
ภาคผนวก ข Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้ง มันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด	145
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	147

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พืชที่เป็นแหล่งของแป้งที่สำคัญ	5
2	ค่าตัวแปรคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)	13
3	สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งชนิดต่างๆ ในขณะที่ให้ความร้อนจาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 75 องศาเซลเซียส	17
4	คุณลักษณะของแป้งชนิดต่างๆ	32
5	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ	43
6	ลักษณะของสัณฐานวิทยา และขนาดของแป้งชนิดต่างๆ	46
7	ปริมาณอะมิโลสและการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทิน	50
8	คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)	52
9	สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ ในการเกิดเจลในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differtial Scanning Calorimeter (DSC)	55
10	สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งรีโทรเกรดชนิดต่างๆ โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	57
11	สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งชนิดต่างๆ	63
12	คุณสมบัติของแป้งที่นำมาวิเคราะห์ด้วย Principal Component Analysis (PCA)	65
13	คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ	68
14	ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	71
15	สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA	78
16	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงที่ใช้อธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	80
17	สมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	สมบัติความเหนียวของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA	90
19	สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ	95
20	สมบัติเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer	100
21	สมบัติความเหนียวของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ	105
22	สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ	110
23	สมบัติเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer	114
ตารางผนวกที่		
1	การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าการไหลเทียบกับน้ำ	141

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภาพแสดงปริมาณการใช้แป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมต่างๆ ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2551	6
2	โครงสร้างของอะมิโลส (ก) และอะมิโลเพกทิน (ข)	7
3	รูปแบบ x-ray diffraction pattern ของแป้ง	9
4	กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)	12
5	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์แป้งด้วยเครื่อง RVA	14
6	การตอบสนองต่อความเค้นหรือความเครียดของวัสดุในช่วง linear viscoelastic	15
7	การเปลี่ยนแปลงของ storage modulus (G') (ก) และ loss modulus (G'') (ข) ของแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง (potato) แป้งข้าวโพด (corn) แป้งสาลี (wheat) และแป้งข้าว (rice) ขณะให้ความร้อน	16
8	ค่า storage modulus (G') สัญลักษณ์ทึบแสง และ loss modulus (G'') สัญลักษณ์โปร่งแสงของสารละลายอะมิโลสของแป้งมันฝรั่งที่ความเข้มข้นร้อยละต่างๆ (■, □= 3%; ●, ○= 2%; ▲, △= 1.8%; ▼, ▽= 1.7%; ◆, ◇= 1.65%; ◀, ▶= 1.62%; ▷, ►= 1.5% ที่ความเครียด 0.025	18
9	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของแป้งย่อยด้วยกรด	21
10	การย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	22
11	โครงสร้างภายในเม็ดแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก	23
12	มันสำปะหลัง	25
13	เผือก	27
14	มันแกว	28
15	กระเจ็บ	29
16	เอนซีท	29
17	ถั่วเขียว	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ถั่วหัวช้าง	31
19	แผนผังขั้นตอนการทดลอง	35
20	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งชนิดต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา (ภาพซ้าย) เปรียบเทียบกับลักษณะ birefringence ของเม็ดแป้งจากกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ (ภาพขวา) ที่กำลังขยาย 50 เท่า	44
21	ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งชนิดต่างๆ	48
22	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer (RVA)	51
23	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงสมบัติอุณหพลศาสตร์การเกิดเจลที่ในเซชันของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differtial Scanning Calorimeter (DSC)	53
24	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงสมบัติอุณหพลศาสตร์การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differtial Scanning Calorimeter (DSC)	56
25	ผลการศึกษาสมบัติวัฏภาคการไหล (temperature sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') ของแป้งความเข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส	58
26	ผลการศึกษาสมบัติวัฏภาคการไหล (temperature sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G'') ของแป้งความเข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส	58
27	ผลการศึกษาสมบัติวัฏภาคการไหล (temperature sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้ง 7 ชนิด (ก), แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว (ภาพเล็ก ก), $\tan \delta$ (ข) ของแป้งความเข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) ณะทำให้เย็นในช่วงอุณหภูมิ 95 ถึง 25 องศาเซลเซียส	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	ผลการศึกษาสมบัติวิฏภาคการไหล (frequency sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้ง 7 ชนิด	62
29	ความสามารถในการถูกย่อยของแป้งชนิดต่างๆ	64
30	การจัดกลุ่มของตัวอย่างแป้ง 7 ชนิด	67
31	การจัดกลุ่มของคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง	67
32	ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	69
33	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับค่าการไหลเทียบกับน้ำของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	73
34	การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นกรดร้อยละ 1 (ก), 2 (ข), 3 (ค), 4 (ง), 5 (จ) และ 6 (ฉ) ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องRVA	74
35	ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	76
36	อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเมื่อวิเคราะห์จากกราฟความหนืดด้วยเครื่อง RVA	77
37	ค่า \ln ของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสุดท้ายกับค่าการไหลเทียบกับน้ำช่วง 0 ถึง 100 (ภาพใหญ่) และช่วง 50 ถึง 80 (ภาพเล็ก) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	82
39	สมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด : การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง (RVA) (ก), ค่า modulus ด้วยเครื่อง rheometer (ข), ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง texture analyzer (ค)	84
40	การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปร(WF 50) ผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ (ง) ด้วยเครื่อง RVA	86
41	ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ	88
42	อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ	89
43	Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ (ง)	91
44	Storage modulus (G') ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ	93
45	Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ขณะทำให้เย็น	94
46	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเจลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด WF 50 (ก), WF 60 (ข), WF 70 (ค), WF 80 (ง) ผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่ความเข้มข้นต่างๆ	97
47	ความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด 4 ระดับผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ (ง) ด้วยเครื่อง RVA	101
49	ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ	103
50	อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ	104
51	การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ (ง)	106
52	Storage modulus (G') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ	108
53	Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ขณะทำให้เย็น	109
54	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเจลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด WF 50 (ก), WF 60 (ข), WF 70 (ค), WF 80 (ง) ผสมกับแป้งถั่วเขียวที่ความเข้มข้นต่างๆ	112
55	ความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ	113
ภาพผนวกที่		
1	ตัวอย่างกราฟ RVA ใช้อ่านค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนืดสูงสุด	143
2	Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดที่มีค่า WF 50 (ก), WF 60 (ข), WF 70 (ค) และ WF 80 (ง)	146

สมบัติโครงสร้างและเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่าง ๆ และการใช้ประโยชน์ เป็นสารปรับปรุงเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด

Structural and Physico-chemical Properties of Various Starches and Their Roles as Gelling Improvers in Blends with Acid-thinned Cassava Starch

คำนำ

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ด หัว ราก และ ลำต้น แหล่งของแป้งจากพืชที่สำคัญจะแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือ/กลาง จะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่ง และแถบเอเชีย แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แป้งที่สำคัญซึ่งมีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและใช้กันทั่วโลก คือ แป้งข้าวโพดที่ผลิตมากในแถบทวีปอเมริกาเหนือ แป้งมันฝรั่งที่ผลิตมากในยุโรป และแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตมากในประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีแป้งอื่นๆ ที่มีการผลิตเชิงการค้าแต่ปริมาณต่ำ ได้แก่ แป้งถั่วเขียว แป้งมันเทศ แป้งข้าว เป็นต้น

เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการแปรรูป แป้งจะมีพฤติกรรมที่สำคัญ 2 ประการ ที่มีผลต่อการใช้ประโยชน์ คือ สมบัติการเป็นแป้งเปียก (viscous) และสมบัติการเป็นเจล (elastic) โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีพฤติกรรมผสมรวมกัน (viscoelastic) ซึ่งจะแตกต่างกัน โดยแป้งจากแหล่งของพืชที่ต่างชนิดกัน จะมีสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การนำไปใช้ประโยชน์จึงแตกต่างกัน เช่น ในด้านความต้องการด้านความหนืดที่สูงจะใช้แป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง จะมีสมบัติคล้ายเป็นของเหลว (liquid-like) มากกว่า เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง เป็นต้น ส่วนแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีสมบัติคล้ายเป็นของแข็ง (solid-like) มากกว่า เช่น แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง แป้งข้าว แป้งถั่วเขียว (Biliaderis, 2009) จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้เกิดฟิล์ม ขึ้นแผ่นได้ดีหรือเกิดเป็นเจล เช่น ในผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว ไข่เมี่ยง เป็นต้น

นอกจากนี้พฤติกรรม viscoelastic ของแป้งยังสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยกระบวนการดัดแปร เพื่อให้แป้งมีสมบัติตรงตามความต้องการกับการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งการดัดแปรที่นิยมใช้และให้ประสิทธิภาพดี คือ การดัดแปรแป้งด้วยวิธีทางเคมี เช่น การดัดแปรด้วยกรด

การตัดแปรรูปโดยวิธีออกซิเดชัน และการย่อยโดยใช้เอนไซม์ การตัดแปรรูปดังกล่าวจะได้แป้งที่มีสมบัติการเป็นเจลเพิ่มมากขึ้นกว่าแป้งที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรรูป กล่าวคือ ขณะแป้งเปียกเย็นตัวลง ค่า storage modulus (G') มีค่าสูงกว่า ค่า loss modulus (G'') ($G' > G''$) ซึ่งแสดงถึงสมบัติการเป็นเจล (elastic) (Rao, 1999)

อย่างไรก็ตาม การตัดแปรรูปทางเคมีมีข้อจำกัด คือ ชนิดและปริมาณสารเคมี เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ทำให้ในกระบวนการตัดแปรรูปแป้งให้ได้ตามเป้าหมายจึงขึ้นอยู่กับสมบัติพื้นฐานของแป้งดิบที่นำมาใช้ในการตัดแปรรูปเองด้วย ดังนั้นการใช้ประโยชน์แป้งดิบที่มีสมบัติพื้นฐานแตกต่างกัน จึงเป็นแนวทางการพัฒนาการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์แป้งโดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อาหาร

แป้งดิบที่มีสมบัติพื้นฐานแตกต่างกันจะได้จากแหล่งของพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งเผือก และแป้งมันแกว แป้งเผือกมีขนาดเม็ดเล็กซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับไมเซลล์ของไขมันในอาหาร (2 ไมโครเมตร) (Jane *et al.*, 1992) การมีขนาดเล็กจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารทดแทนไขมันในอาหารได้ ในขณะที่แป้งมันแกวซึ่งมีผลผลิตสูงและการสกัดแป้งสามารถทำได้ง่าย (Melo *et al.*, 1994) แป้งเผือกมีความหนืดสูงและมีความใสปานกลาง นอกจากนี้ แป้งจากพืชผล เช่น กระจับและแป้งเอนซีทจากส่วนของลำต้นใต้ดิน พบว่า มีปริมาณอะมิโลสสูง (Tulyathan *et al.*, 2005; Gebre-Mariam and Schmidt, 1996) จึงทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี และได้เจลที่มีลักษณะทึบแสง สำหรับแป้งจากพืชตระกูลถั่ว เช่น แป้งถั่วเขียว แป้งถั่วหัวช้าง เป็นแป้งที่ผลิตได้ปริมาณสูงถึงร้อยละ 49 ปริมาณอะมิโลสที่ตรวจสอบได้ค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 11.6 ถึง 88 มีการละลายและการพองตัวที่สูงกว่าแป้งธัญพืช แป้งจากพืชตระกูลถั่วเป็นแป้งที่เกิดการคิ่นตัวสูง (ค่า setback สูง) (Hoover *et al.*, 2010) ให้ลักษณะของเจลแข็งทึบแสง จากการตรวจสอบเอกสาร พบว่า มีงานวิจัยที่สนใจศึกษาสมบัติต่างๆ ของแป้งเหล่านี้ โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาสมบัติด้านโครงสร้าง ปริมาณอะมิโลส ลักษณะเม็ดแป้ง และสมบัติความหนืด แต่ยังมีข้อมูลด้านรีโอโลยี ซึ่งเป็นสมบัติ viscoelastic ของแป้งไม่มากนัก

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาโครงสร้างและสมบัติด้านรีโอโลยีของแป้งที่มีการใช้ประโยชน์อยู่น้อย ได้แก่ แป้งเผือก แป้งมันแกว แป้งกระจับ แป้งเอนซีท แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง เปรียบเทียบกับมันสำปะหลัง และนำไปปรับปรุงลักษณะของเจลแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปด้วยกรด ด้วยวิธีการทำแป้งผสม ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติโครงสร้าง สมบัติด้านรีโอโลยี ของแป้ง 6 ชนิด ได้แก่ แป้งเผือก แป้งมันแกว แป้งกระจับ แป้งเอนชิต แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยกรด
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางรีโอโลยี ของแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปด้วยกรด กับแป้งที่มีอะมิโลสสูง

การตรวจเอกสาร

1. แหล่งของแป้ง

คำว่า “แป้ง” ที่คนไทยเรียกกันทั่วๆ ไปนั้นได้รวมความหมายเกี่ยวกับการเรียกแป้งในภาษาอังกฤษ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน คือ แป้งฟลาว (flour) และแป้งสตาร์ช (starch) ซึ่งทั้งคู่มีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยแป้งฟลาว (flour) หมายถึง แป้งที่นำวัตถุดิบมาโม่หรือบดจนละเอียดมาก มีส่วนประกอบของสารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบดั้งเดิมทั้งหมด หรือเกือบทั้งหมด คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุต่างๆ ส่วนแป้งสตาร์ช (starch) หมายถึง แป้งที่ผ่านกรรมวิธีการแยกเอาเฉพาะส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต โดยมีสารอื่นปะปนน้อยที่สุด ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแป้งที่เป็นสตาร์ช

พืชเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานเคมีสะสมในรูปของแป้งหรือน้ำตาลซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรม การสะสมของแป้งในพืชจะเกิดในส่วนของเมล็ด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าว ถั่วเขียว ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของธัญพืชและพืชตระกูลถั่ว นอกจากนี้ในส่วนของรากและลำต้นใต้ดินได้แก่ มันสำปะหลัง มันฝรั่ง มันเทศ พุทธรักษา ซึ่งจัดเป็นพืชหัวที่เป็นแหล่งของแป้งที่สำคัญเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พืชที่เป็นแหล่งของแป้งที่สำคัญ

ชนิดของพืช	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่ออื่นๆ	แหล่งสะสมแป้ง
ข้าวโพด ¹	<i>Zea Mays</i>	maize, corn	เมล็ด
ข้าว ¹	<i>Oryza sativa</i> L.	rice	เมล็ด
ข้าวสาลี ¹	<i>Triticum</i> spp.	wheat	เมล็ด
มันฝรั่ง ¹	<i>Solanum tuberosum</i>	potato	หัว
มันสำปะหลัง ¹	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	cassava	ราก
มันเทศ ¹	<i>Ipomoea batatas</i> Lam.	sweet potato	ราก
เผือก ²	<i>Colocasia esculenta</i>	taro, dasheen, old cocoyam	หัว
มันแกว ²	<i>Pachyrhizus erosus</i>	yam bean, jicama	หัว
กระเจี๊ยบ ³	<i>Trapa natans</i>	water caltrop, water chestnut	ผล
ปาล์มสาแหร ⁴	<i>Metroxylon sagu</i>	sago	ลำต้น
พุทธรักษา ⁴	<i>Canna edulis</i>	canna	เหง้า
ขิง ⁴	<i>Zingiber officinale</i>	ginger	เหง้า
เอนซีท ⁵	<i>Ensete ventricosum</i>	ensete	ลำต้นใต้ดิน
ถั่วเขียว ⁶	<i>Vigna radiata</i>	mungbean	เมล็ด
ถั่วหัวช้าง ⁷	<i>Cicer arietinum</i>	chickpea, garbanzo	เมล็ด

ที่มา: ¹ Moorthy (2004)

² สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2544)

³ บุญมา (2550)

⁴ Hoover (2001)

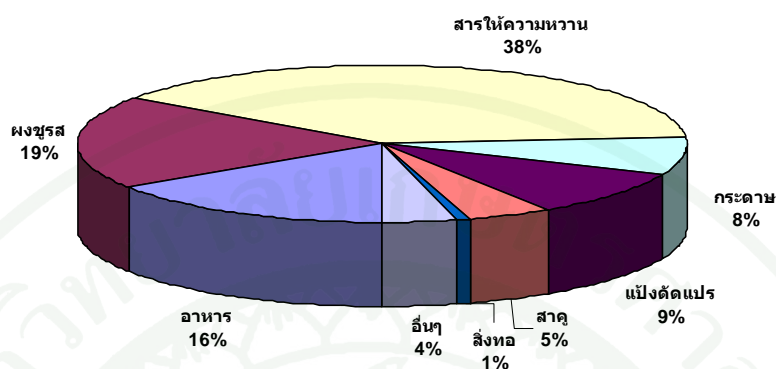
⁵ Tsegaye and Tadele (2007)

⁶ Ohwada *et al.* (2003); Agugo and Onimawo (2009)

⁷ วิทย์ (2546); Huang *et al.* (2007)

สำหรับประเทศไทยแป้งที่ผลิตมากที่สุดคือแป้งมันสำปะหลังซึ่งได้มีการผลิตเป็นแป้งคุณภาพสูง การผลิตในปี 2551 ซึ่งสำรวจโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่าประเทศไทยสามารถผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ในปริมาณ 3.81 ล้านตัน ส่งออกจำหน่ายต่างประเทศประมาณ

2.52 ล้านตัน มีการใช้แป้งมันสำปะหลังในประเทศประมาณ 1.29 ล้านตันสามารถแบ่งสัดส่วนการใช้ได้ดังภาพที่ 1

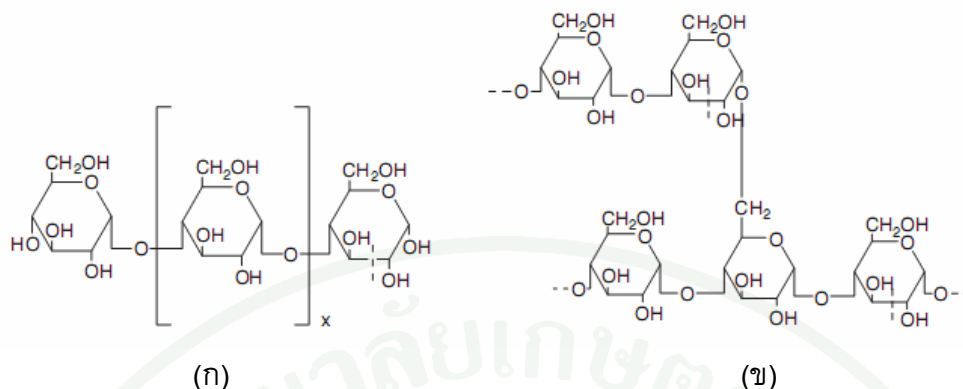


ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงปริมาณการใช้แป้งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมต่างๆ ของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2551

แป้งจากแหล่งธรรมชาติที่ได้จากพืชต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สภาพการปลูก และวิธีการสกัดด้วย คุณสมบัติที่ต่างกันนี้ทำให้แป้งแต่ละชนิดมีความเหมาะสม ในการใช้ประโยชน์แตกต่างกันออกไป Hoover *et al.* (2010) ศึกษาสมบัติของแป้งจากพืชตระกูลถั่วพบว่าปริมาณแป้งสูงถึงร้อยละ 49 ปริมาณอะมิโลสที่เป็นองค์ประกอบในแป้งมีค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นสมบัติที่ส่งผลให้แป้งจากพืชตระกูลถั่ว มีลักษณะเจลที่แข็งและทึบแสง นอกจากนี้มีการศึกษาพืชชนิดอื่นที่เป็นแหล่งสะสมแป้ง เช่น กระเจี๊ยบ เปือก เป็นต้น กระเจี๊ยบมีการผลิตและการใช้ประโยชน์ไม่มากนัก ส่วนใหญ่กระเจี๊ยบที่เก็บเกี่ยวได้นำมาต้มและทำกระเจี๊ยบกระป๋อง Tulyathan *et al.* (2005) พบว่าแป้งกระเจี๊ยบมีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 30 เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี สามารถเกิดเจลที่มีลักษณะทึบแสง ปริมาณแป้งที่สกัดได้จากกระเจี๊ยบคิดเป็นร้อยละ 46 ซึ่งเป็นแหล่งแป้งที่น่าสนใจ

2. องค์ประกอบและโครงสร้างแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group



ภาพที่ 2 โครงสร้างของอะมิโลส (ก) และอะมิโลเพกทิน (ข)

ที่มา: Pérez *et al.* (2009)

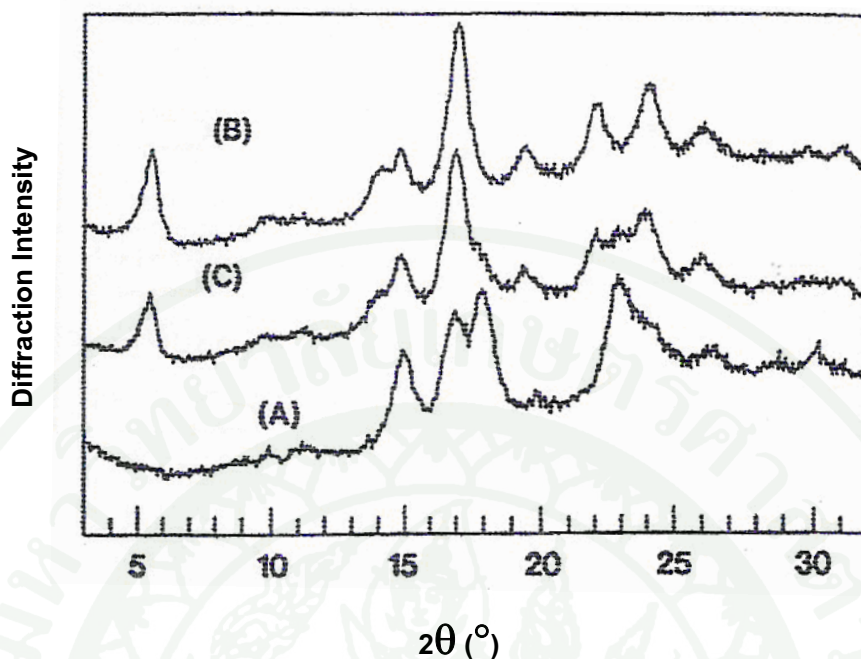
แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกทิน (amylopectin) อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic ส่วนอะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสเชิงเส้นขนาดสั้นที่ถูกรวมเข้าด้วยกันเป็นกิ่งก้านด้วยพันธะ α -1, 6-glucosidic (Gallant *et al.*, 1992) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน แป้งข้าวโพด แป้งสาลี จะมีปริมาณของอะมิโลสประมาณ ร้อยละ 28 เมื่อเทียบกับแป้งจากพืชหัวและราก เช่น แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะมีปริมาณอะมิโลสเพียงร้อยละ 20 ในขณะที่แป้งจากถั่ว เช่น smooth pea จะมีปริมาณอะมิโลส ค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 35 และใน wrinkled pea มีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 66 แป้งชนิดที่ไม่มีอะมิโลสอยู่เลยหรือมีในปริมาณที่น้อยมากเป็นกลุ่มของแป้ง waxy ซึ่งพบในข้าวโพด (waxy maize) ข้าวฟ่าง (waxy sorghum) ข้าวบาร์เลย์ (waxy barley) และ ข้าว (waxy rice) สำหรับข้าวโพดบางสายพันธุ์ที่ผ่านการดัดแปร จะมีปริมาณอะมิโลสสูงถึงร้อยละ 50-70 เรียกว่าแป้งข้าวโพดอะมิโลสสูง หรือ amylo maize (Young, 1984)

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส Hizukuri (1986) ได้เสนอ cluster model ในการอธิบายโครงสร้างอะมิโลเพกทิน ซึ่งแบ่งสายโซ่ (chain) เป็น 3 ชนิด คือ สาย A สาย B และสาย C โดยสาย A (A-chain) เป็นสายโซ่ส่วนที่อยู่นอกสุด ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า และ สาย C (C-chain) ที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ อะมิโลเพกทินมีการกระจายตัวของสายโซ่แบบ polymodal ได้แก่ A, B1, B2, B3 และ B4 โดยสาย A และสาย B1 ประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว (single cluster)

สำหรับสาย B2, B3 และ B4 มีความยาวของสายแผ่ออกไปในโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2, 3 และ 4 กลุ่มหรือมากกว่านั้น ตามลำดับ ซึ่งมีความยาวสายโซ่ต่างๆ กัน (Hizukuri, 1986) โดยสาย A, B1, B2 และ B3 จะมีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) อยู่ในช่วง 6-12, 13-24, 25-36 และ ≥ 37 ตามลำดับ (Hanashiro *et al.*, 1996)

ภายในเม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของ อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ซึ่งเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน การเกาะเกี่ยวนี้จะทำให้เกิด โครงสร้างที่มีลักษณะชั้นๆ ของส่วนโครงสร้างผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) สลับกันไปมาอย่างเป็นระเบียบ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์จะเกิดปรากฏการณ์ cross pattern ที่เรียกว่า birefringence ส่วนที่มีดที่ปรากฏเป็นสองแขนตัดกันเป็นตำแหน่งของ สายโมเลกุลอะมิโลส และอะมิโลเพกทินที่อยู่ในลักษณะตั้งฉาก และขนานกับแสงโพลาไรซ์ ส่วน พื้นที่สว่างจะเป็นตำแหน่งของสายโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่ไม่ได้ตั้งฉากหรือขนาน ระนาบแสง ส่วนผลึกเป็นบริเวณที่มีการพองตัวอย่างจำกัดจึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยา กับสารอินทรีย์ได้ยาก อีกส่วนหนึ่ง คือ บริเวณอสัณฐาน ซึ่งมีการจัดเรียงแบบหลวมจึงดูดซึมน้ำและ เกิดปฏิกิริยาเคมีดีกว่าส่วนที่เป็นผลึก (Oates, 1997; Radley, 1976)

ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกเมื่อตรวจสอบด้วย x-ray diffraction สามารถ แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ชนิด A ชนิด B และชนิด C แบ่งที่พบในธัญพืชส่วนใหญ่และแบ่ง จากส่วนราก จะเป็นชนิด A เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าว แป้งสาเลี แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก จะให้พีคที่ 17° และ $17.9^{\circ}2\theta$ แต่ไม่มีพีคที่ $5.6^{\circ}2\theta$ แป้งที่พบในส่วนหัว และแป้งที่มีปริมาณ อะมิโลสสูงจะเป็น ชนิด B เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งพุทธรักษา แป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูง จะให้พีคที่ 5.6° และ $17^{\circ}2\theta$ แต่ไม่มีพีคที่ $17.9^{\circ}2\theta$ แป้งที่พบในพืชตระกูลถั่ว จะเป็นชนิด C จะมีพีคที่ 5.6° และ $7.9^{\circ}2\theta$ แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบของ x-ray diffraction pattern ต่างกัน (Hizukuri, 1996) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 รูปแบบ x-ray diffraction pattern ของแป้ง

ที่มา: Hizukuri (1996)

3. สมบัติของแป้ง

3.1 การเกิดเจลลาคีโนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีโนเซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกันเชื่อมต่อกัน แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีโนเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิเตรนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นแบบไม่ผันกลับ เรียกว่า การเกิดเจลลาคีโนเซชัน (Eliasson and Gudmundsson, 1996)

เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดเจลลาคีโนเซชัน เม็ดแป้งบางส่วนจะพองตัวเต็มที่และแตกออก ทำให้อะมิโลสสามารถละลายออกมาได้ เมื่อปล่อยให้เย็น

ตัวลง โครงสร้างภายในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยโมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง องค์ประกอบที่มีในแป้ง อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแป้ง ในกรณีของแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ถ้าความเข้มข้นของแป้งต่ำ จะเกิดเป็นตะกอน (precipitate) แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูงจะเกิดเป็นร่างแหสามมิติ เรียกว่า การเกิดเจล (gelation) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Morris, 1990; Lang, 2004)

แหล่งของแป้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้ง กล่าวคือ อะมิโลสจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่าอะมิโลเพกทิน โดยอะมิโลสในแป้งจะเปลี่ยนรูปร่างเป็น double helix ทันทีหลังเกิดเจลาทีไนเซชัน นอกจากนี้อะมิโลสมีผลต่อคุณสมบัติด้านความแข็งของเจล โดยแป้งข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสมากกว่าจะมีลักษณะเจลที่แข็งแรงกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันสูงสุดเมื่อความยาวสายโซ่ของอะมิโลสประกอบด้วยกลูโคส 80-100 หน่วย (DP) (Srichuwong and Jane, 2007) สำหรับอะมิโลเพกทินจะใช้เวลาในการเกิดรีโทรเกรเดชันนานกว่า อาจใช้เวลาหลายวันหรือเป็นสัปดาห์ เนื่องจากโครงสร้างของอะมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นกิ่งก้านทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้ยากกว่า อะมิโลเพกทินที่มีความยาวของสายโซ่สั้น (DP 6-9 หรือ 6-12) จะยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันซึ่งพบในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (Shi and Seib, 1992) และแป้งจากแหล่งต่างๆ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าว แป้งมันเทศ เป็นต้น (Srichuwong *et al.*, 2005) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างปริมาณสายโซ่สั้นกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน นอกจากนี้องค์ประกอบอื่น ได้แก่ ไขมันซึ่งมีผลให้การเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี โดยไขมันจะจับกับอะมิโลสเกิดเป็นสายประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) ซึ่งทำให้แป้งถั่วเขียวมีค่า setback สูงขณะที่ลดอุณหภูมิลงในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืด Rapid Visco Analyzer (RVA) (Kasemsuwan *et al.*, 1998) นอกจากนี้การเกิดเจลของแป้งยังขึ้นอยู่กับการดัดแปรแป้ง (Wang *et al.*, 2003) ความเข้มข้นของแป้ง สภาวะในการเกิดเจล และส่วนประกอบอื่นๆ ในอาหาร

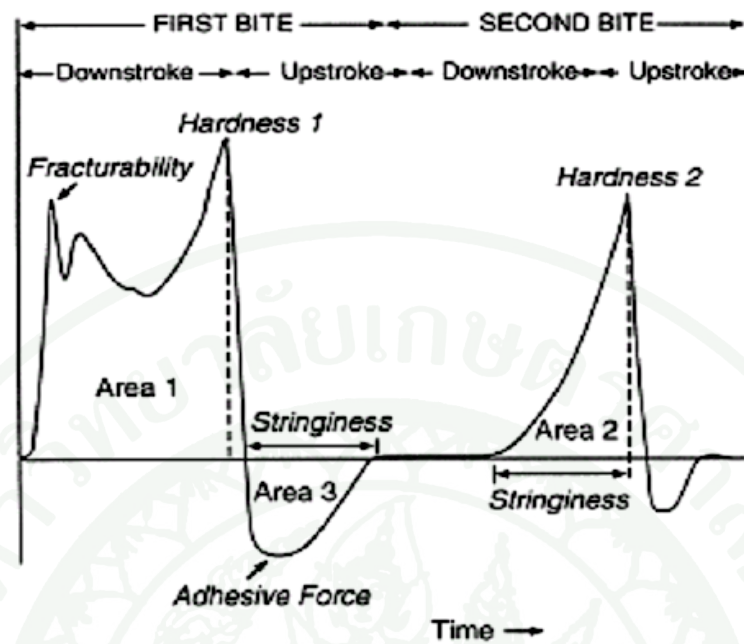
3.2 สมบัติทางรีโอโลยี (Rheological Properties)

สมบัติทางรีโอโลยี เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) และการไหล (flow) ของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุนั้นๆ โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นของแข็งที่แสดงออกมาในรูปของความยืดหยุ่น (elastic) หรือการคืนกลับรูปร่างของโครงสร้างหลังจากให้แรง ในขณะที่การไหลเป็นพฤติกรรมของวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นของเหลวที่แสดงออกมาในรูปของความหนืด (viscous) หรือแรงต้านทานต่อการไหล (Steffe, 1996) ผลิตภัณฑ์อาหารส่วน

ใหญ่จะแสดงออกเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างความยืดหยุ่นและความหนืด ซึ่งพฤติกรรมแบบนี้เรียกว่า พฤติกรรมแบบ viscoelastic เนื่องจากภายในโครงสร้างของวัสดุชีวภาพเหล่านี้ประกอบด้วยส่วนที่มีลักษณะของแข็งและของเหลวอยู่ร่วมกัน ผลลัพธ์จากแป้ง เช่น แป้งเปียกหรือเจล เป็นวัสดุชีวภาพอีกชนิดหนึ่งที่แสดงพฤติกรรมแบบ viscoelastic เพราะโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงร่างสามมิติของอะมิโลสล้อมรอบเม็ดแป้งที่พองตัว ซึ่งมีโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบคล้ายลักษณะโครงร่างภายในของของแข็ง และส่วนที่เป็นเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งจะมีการเคลื่อนที่เมื่อได้รับแรงคล้ายลักษณะของของเหลว การตอบสนองทางรีโอโลยีของผลิตภัณฑ์จากแป้งจึงมีทั้งพฤติกรรมแบบของแข็งยืดหยุ่นและของเหลวหนืด (Hsu *et al.*, 2000)

การตรวจสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยี เพื่อศึกษาโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุ รวมทั้งผลลัพธ์จากแป้งแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ large deformation และ small deformation โดยวิธีการทดสอบแบบ large deformation จะให้แรงเป็นจำนวนมากกับวัสดุหรือมีความเค้นเฉือนมากระทำต่อวัสดุ ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย ได้แก่ การวัดค่าเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis) การวัดสมบัติแป้งเปียก (pasting properties) ด้วย Brabender Visco-amylograph หรือ Rapid Visco Analyzer (RVA) ในขณะที่วิธีการทดสอบแบบ small deformation จะเป็นการทดลองที่ใช้แรงน้อย ซึ่งจะไม่ทำลายโครงสร้างของวัสดุ ได้แก่ การทดสอบ dynamic oscillatory test (Karim *et al.*, 2000)

3.2.1 การวัดค่าเนื้อสัมผัส (Textural Profile Analysis) โดยเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ หลักการพื้นฐาน คือ จะกล่าวถึงคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสที่สามารถทำการวัดค่าได้ โดยการใช้เครื่องมือกดตัวอย่างที่มีความสูงที่แน่นอนด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดที่กำหนดไว้ หลังจากหัวกดเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นจะทำการกดตัวอย่างช้าลงไปอีกครั้งหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกับเวลา ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)

ที่มา: Bourne (2002)

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของการวัดค่าเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA)

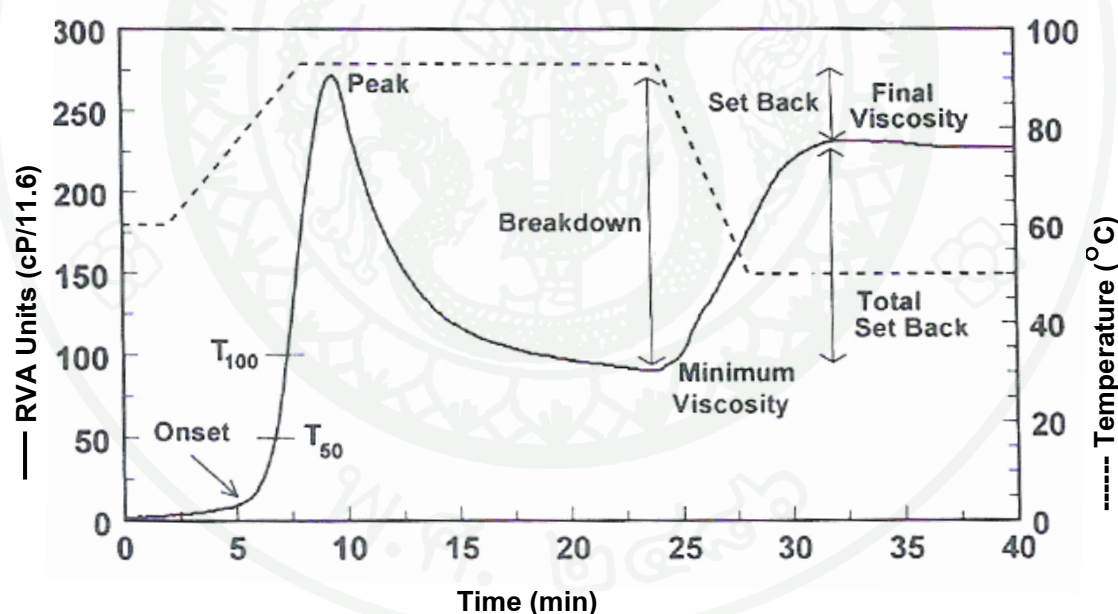
คุณลักษณะ	การคำนวณจากกราฟ
ความแข็ง (Hardness)	ค่าสูงสุดของแรงที่เกิดขึ้น ณ จุดสุดท้ายของการกดใน รอบแรก
การแตกหัก (Fracturability)	ค่าของแรงที่เกิดขึ้นเป็นค่าแรก (พบในอาหารบางชนิด)
ความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness)	อัตราส่วนระหว่าง Area 2 ต่อ Area 1 (A1/A2)
ความยืดหยุ่น (Springiness)	ระยะทางที่ตัวอย่างคืนตัวกลับ
ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ (Adhesiveness หรือ Stickiness)	พื้นที่ใต้กราฟที่ให้ค่าเป็นลบ (Area 3)
ความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess)	ผลคูณของค่าความแข็งกับความสามารถเกาะรวมตัวกัน (ค่าความแข็ง X ความสามารถเกาะรวมตัวกัน)
การทนต่อการเคี้ยว (Chewiness)	ผลคูณของค่าความแข็งความสามารถเกาะรวมตัวกัน และค่าความยืดหยุ่น (ค่าความแข็ง X ความสามารถเกาะ รวมตัวกัน X ค่าความยืดหยุ่น)

ที่มา: Karim *et al.* (2000)

Kasemsuwan *et al.* (1998) ศึกษาการเติมแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงในแป้งมันสำปะหลังพบว่า การเพิ่มปริมาณของแป้งข้าวโพดอะมิโลสสูงทำให้ความแข็งของเจลแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น โดยพบว่าแป้งมันสำปะหลังซึ่งเตรียมที่ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 10 มีความแข็งเพียง 1.5 กรัม แต่เมื่อเติมแป้งข้าวโพดอะมิโลสสูงในอัตราส่วนร้อยละ 13 และร้อยละ 17 พบว่าความแข็งของเจลแป้งผสมมีค่าเป็น 2.6 และ 3.2 กรัม ตามลำดับ

3.2.2 การวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser: RVA)
ติดตามการเกิดเจลลาที่ในเซชันโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างการให้ความร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น

เมื่อให้ความร้อนและกวนตลอดเวลาแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้แป้งมีความหนืดและความใสมากขึ้น เรียกอุณหภูมิที่สารละลายน้ำแป้งเริ่มมีความหนืดว่า *pasting temperature* เมื่อให้ความร้อนต่อไปเม็ดแป้งจะพองตัวเต็มที่ทำให้เกิดความหนืดที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเรียกจุดนี้ว่า *peak viscosity* หลังจากนั้นเม็ดแป้งจะเริ่มแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสจะกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง ค่าความหนืดของแป้งจะลดลง เมื่อระบบลดอุณหภูมิจาก 95 องศาเซลเซียส เป็น 50 องศาเซลเซียส โมเลกุลของอะมิโลสจะกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ เป็นลักษณะเจลเกิดขึ้น ความหนืดของแป้งจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง เรียกจุดนี้ว่าความหนืดสุดท้าย (*final viscosity*) สำหรับค่า *setback* เป็นค่าที่คำนวณจากผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (*total setback*) หรือคำนวณจากผลต่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (*setback*) (Newport Scientific, 1995) ซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งเปียก กล่าวคือ ถ้ามีค่าการคืนตัวมากหรือมีค่าเป็นบวกจะมีลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี และมีแนวโน้มที่จะให้เจลแป้งที่แข็งมาก (Beta and Corke, 2001)



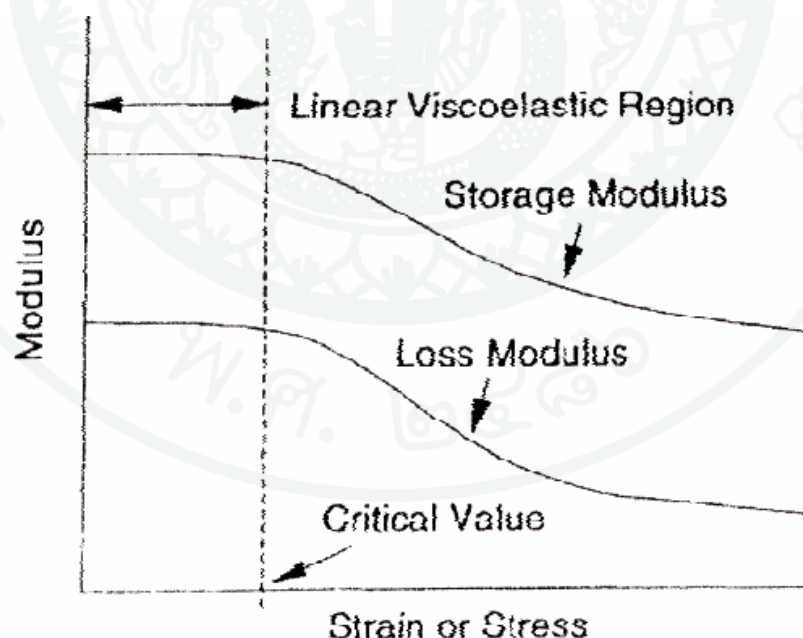
ภาพที่ 5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์แป้งด้วยเครื่อง RVA

ที่มา: Zeng *et al.* (1997)

3.2.3 การทดสอบแบบ dynamic oscillatory สามารถนำมาประเมินกลไกการเกิดสมบัติของแป้งได้ เช่น การศึกษาความแข็งแรงของเจล การเกิดเจลที่ไบนารีชัน การเปลี่ยน

สถานะและความคงตัวในขณะเก็บรักษา ตัวอย่างวิธีการทดสอบแบบ dynamic oscillatory ได้แก่ amplitude sweep, temperature sweep และ frequency sweep โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่า dynamic moduli ซึ่งค่าที่ตรวจวัด ได้แก่ ค่า storage modulus (G') เป็นพลังงานที่เก็บไว้ในวัสดุซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุที่เป็นของแข็ง ค่า loss modulus (G'') เป็นพลังงานที่ใช้ในวัสดุหรือสูญเสียไปซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีพฤติกรรมคล้ายของเหลว และค่า loss factor (damping factor: $\tan \delta$) เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณผลหารของพลังงานที่สูญเสียกับพลังงานที่ถูกเก็บซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้พฤติกรรมของระบบ โดย $\tan \delta$ มีค่ามาก วัสดุจะมีสมบัติคล้ายเป็นของเหลว (liquid-like) ถ้ามีค่าน้อยวัสดุจะมีสมบัติคล้ายเป็นของแข็ง (solid-like)

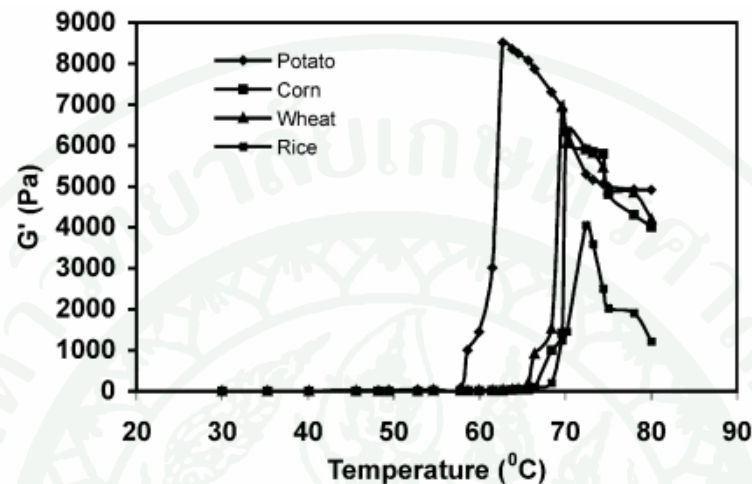
การทดสอบ amplitude sweep เป็นการให้ความถี่เชิงมุมของความเค้น (ω) คงที่ แต่แปรค่าความเค้นหรือความเครียด (stress หรือ strain) เพื่อหาช่วงของความเค้นที่วัสดุแสดงพฤติกรรมแบบ linear viscoelastic ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของวัสดุจะไม่ขึ้นกับค่าความเค้นหรือความเครียด นั่นคือ โครงสร้างภายในไม่เกิดความเสียหาย ดังรูปที่ 6 โดยวัสดุที่มีความแข็งแรงจะมีช่วง linear viscoelastic ยาวกว่าวัสดุที่มีความอ่อน (Steffe, 1996)



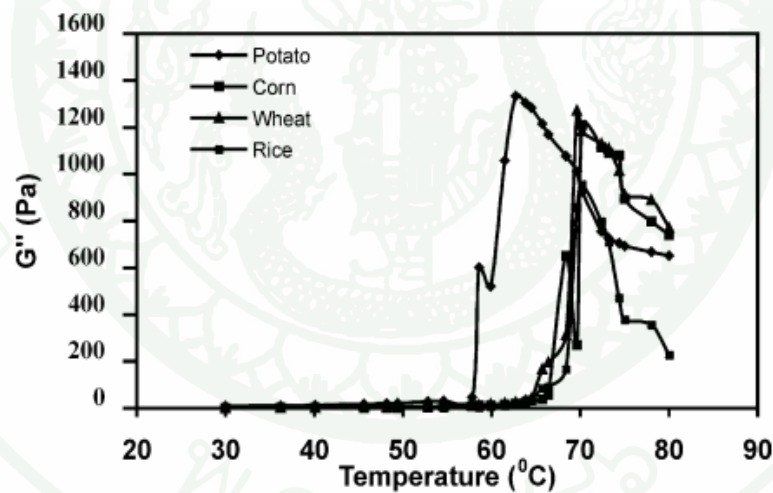
ภาพที่ 6 การตอบสนองต่อความเค้นหรือความเครียดของวัสดุในช่วง linear viscoelastic

ที่มา: Steffe (1996)

การทดสอบ temperature sweep เป็นการให้ค่าความเค้นและความถี่เชิงมุมของความเค้น (ω) คงที่ แต่แปรอุณหภูมิในการทดสอบ ซึ่งจะใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการให้ความร้อน หรือเมื่อผ่านกระบวนการทำให้เย็น (ภาพที่ 7)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของ storage modulus (G') (ก) และ loss modulus (G'') (ข) ของแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง (potato) แป้งข้าวโพด (corn) แป้งสาลี (wheat) และแป้งข้าว (rice) ขณะให้ความร้อน

ที่มา: Singh *et al.* (2003)

โดยเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งค่า G' จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุด (peak G') หลังจากนั้น G' จะค่อยๆ ลดลง การเพิ่มขึ้นของ G' ในช่วงแรกเป็นการบ่งชี้ถึงการบวมของเม็ดแป้งหรือการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งเป็นโซล (sol) เมื่อถึงจุดหนึ่งเม็ดแป้งจะบวมเต็มที่และแตกออกซึ่งส่งผลให้ค่าพลังงานที่เก็บไว้ในโมเลกุลถูกทำลายเป็นผลทำให้ค่า G' ลดลง สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งแตกต่างกันไปตามโครงสร้างของเม็ดแป้งและองค์ประกอบ (ภาพที่ 7 และตารางที่ 3) กล่าวคือเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างกลมจะมีค่า G' น้อยกว่า ขณะที่เม็ดแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสน้อยก็จะแสดงค่า G' ที่ต่ำกว่าเช่นกัน (Singh *et al.*, 2003)

ตารางที่ 3 สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งชนิดต่างๆ ในขณะให้ความร้อนจาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 75 องศาเซลเซียส

แหล่งของแป้ง	ขนาดของเม็ดแป้ง (ไมโครเมตร)	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	$T_{G'}$ (องศาเซลเซียส)	Peak G' (Pa)
มันฝรั่ง	20-100	20.1-31.0	62.7	8519
ข้าวโพด	15-20	22.4-32.5	70.2	6345
ข้าว	3-5	5.0-28.4	72.4	4052
ข้าวสาลี	-	18.0-30.0	69.9	6935

หมายเหตุ $T_{G'}$ คือ อุณหภูมิขณะที่ค่า G' เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

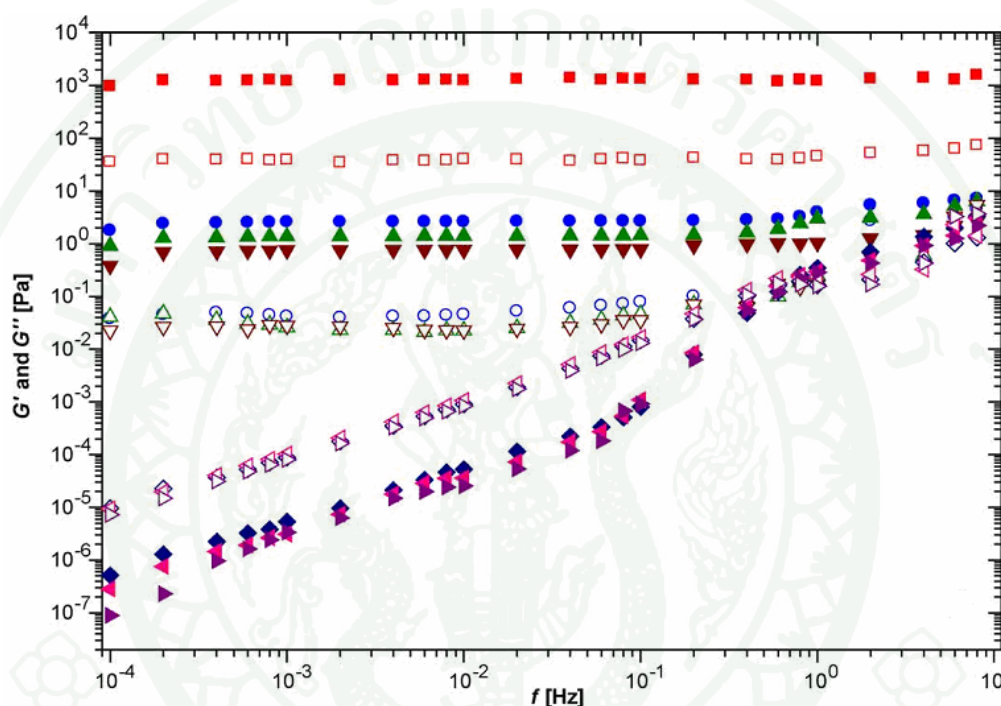
Peak G' คือ ค่า G' ที่มีค่าสูงสุดขณะให้ความร้อน

ที่มา: Singh *et al.* (2003)

เมื่อสารละลายน้ำแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนเย็นตัวลง ค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะมิโลสที่ละลายออกมาจะจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างสามมิติจนเกิดเป็นเจล

การทดสอบ frequency sweep เป็นการให้ค่าความเค้นหรือความเครียดคงที่ แต่แปรความถี่ในการทดสอบ ซึ่งใช้อธิบายโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุที่มีองค์ประกอบต่างกัน ตัวอย่างเช่น การทดสอบ frequency sweep กับสารละลายอะมิโลสของแป้งมันฝรั่งที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าสามารถแบ่งพฤติกรรมของสารละลายออกเป็น 2 กลุ่ม

คือ กลุ่มที่มีสารละลายอะมิโลสต่ำกว่าร้อยละ 1.7 จะมีค่า loss modulus (G'') มากกว่า storage modulus (G') แต่จะมีค่าเข้าใกล้กันเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างจะมีความหนืดมากกว่าความยืดหยุ่น ขณะที่กลุ่มที่มีสารละลายอะมิโลสที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 1.7 จะมีค่า storage modulus (G') มากกว่า loss modulus (G'') ตลอดช่วงความถี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าความหนืด



ภาพที่ 8 ค่า storage modulus (G') สัญลักษณ์ทึบแสง และ loss modulus (G'') สัญลักษณ์โปร่งแสงของสารละลายอะมิโลสของแป้งมันฝรั่งที่ความเข้มข้นร้อยละต่างๆ
 (■, □ = 3%; ●, ○ = 2%; ▲, △ = 1.8%; ▼, ▽ = 1.7%; ◆, ◇ = 1.65%; ◀, ▶ = 1.62%; ▷, ► = 1.5% ที่ความเครียด 0.025

ที่มา: Ortega-Ojeda *et al.* (2004)

3.3 แป้งดัดแปร

แป้งดัดแปร (modified starch) ความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด

แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมี และ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ที่บ่งต่างๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535)

BeMiller (1997) ได้แบ่งการดัดแปรแป้งไว้ 3 กลุ่มดังนี้

3.3.1 การดัดแปรแป้งทางเคมี (chemical modification)

ก. การเกิดอนุพันธ์ (derivatization)

1) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งแอซีเทต หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล

2) การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิง (cross-linked starch)

ข. การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด

ค. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น แป้งออกซิไดซ์ซึ่งเป็นแป้งที่มีประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลแป้ง ทำให้อัตราการคั่งตัวของแป้งเปียกลดลง แป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใช้แป้งเปียกที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ แป้งเปียกมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง (Sander, 1996) นอกจากนี้แป้งออกซิไดซ์ยังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แข็งและใสมากขึ้น

ง. การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรดเพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทรินซึ่งมีคุณสมบัติการเกิดเจลจึงนำมาใช้เป็นสารทดแทนส่วนที่เป็นไขมันหรือน้ำมันในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันสูง (Kennedy *et al.*, 1995)

3.3.2 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

ก. เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแป้งจนผ่านขั้นตอนของการเจลาติไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์

ข. แป้งละลายน้ำเย็น (Granular-Cold-Water-Soluble-Starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลลาทีในเซชัน

ค. การลดขนาดแป้งโดยทางกล (ball mill treatment) จะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

3.3.3 การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification) การตัดแปรด้วยวิธีนี้เป็น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม แป้งตัดแปรในกลุ่มนี้ที่สำคัญ ได้แก่

ก. waxy starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

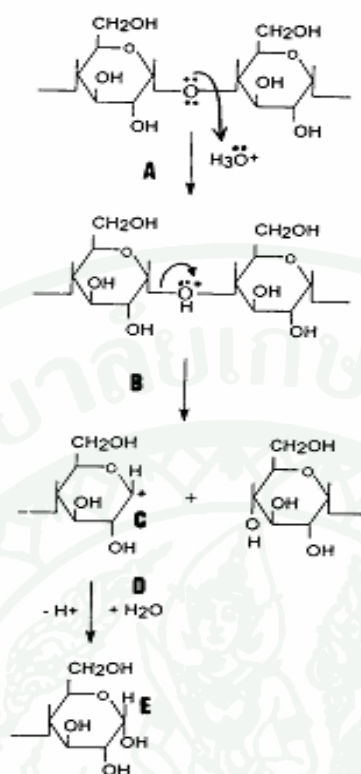
ข. high-amylose starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสสูง

การตัดแปรแป้งดิบทำให้สมบัติบางประการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลลาทีในเซชัน การคิ่นตัว และการสูญเสีย น้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ลักษณะเนื้อเจลดีขึ้น (BeMiller, 1997; Light, 1990)

4. การตัดแปรแป้งด้วยกรด

การตัดแปรแป้งโดยวิธีการย่อยแป้งด้วยกรด เป็นการทำปฏิกิริยาของแป้งกับกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และขนาดโมเลกุลแป้งเปลี่ยนไป ได้แป้งตัดแปรที่เรียกว่าแป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch หรือ thin-boiling starch)

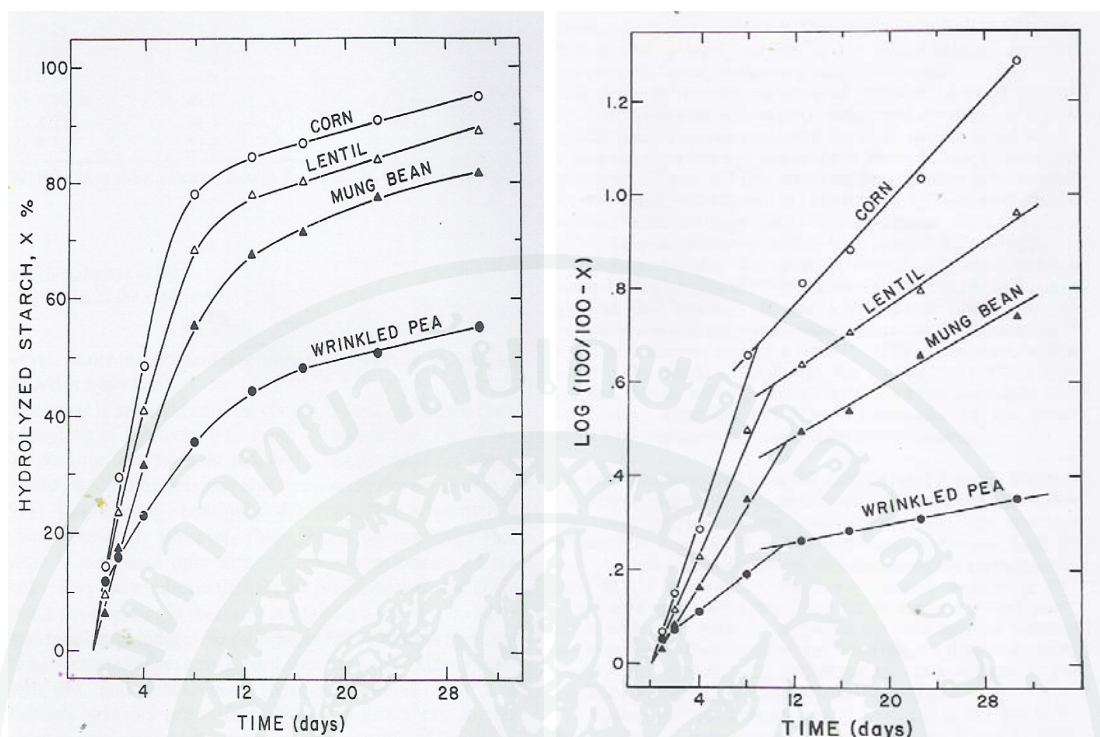
กระบวนการผลิตแป้งย่อยด้วยกรด โดยทั่วไปเริ่มจากการใช้กรดทำปฏิกิริยากับสารละลายแป้งความเข้มข้นร้อยละ 30-40 ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้ง (ประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส) กวนเป็นเวลานานพอที่จะทำให้แป้งตัดแปรมีความเหนียวตามต้องการ ทำให้เป็นกลาง กรอง ล้างแล้วทำให้แห้ง (Wurzburg, 1986) ในการย่อยแป้งด้วยกรด กรดจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะไกลโคซิดิก ทำให้สายสั้นลงโดยที่พันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิกจะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าพันธะแอลฟา 1,6 ไกลโคซิดิก (Wurzburg, 1986) โปรตรอนจะเข้าทำลายพันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิก ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และออกซิเจน ดังแสดงกลไกในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของแป้งย่อยด้วยกรด

ที่มา: Hoover (2000)

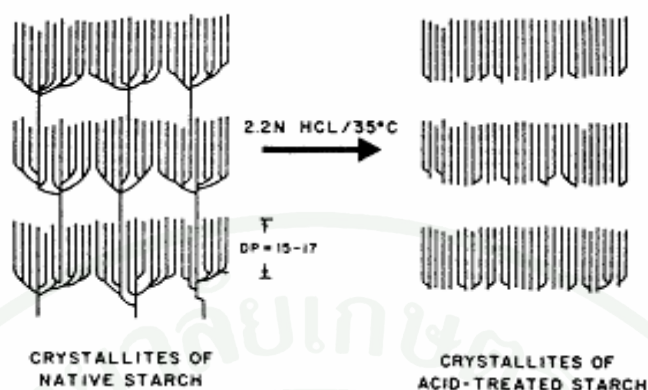
ระยะแรกของการย่อยแป้งด้วยกรดจะเกิดขึ้นในส่วนของอสัณฐาน และมีอัตราการย่อยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดนานขึ้น กรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนผลึก การย่อยโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลง ดังแสดงในภาพที่ 10 (Biliaderis *et al.*, 1981; Wurzburg, 1986)



ภาพที่ 10 การย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.2 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ที่มา: Biliaderis *et al.* (1981)

โดยทั่วไปสมบัติของแป้งย่อยด้วยกรดที่ผลิตได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกันที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ชนิดของกรด ความเข้มข้นของแป้ง และสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดมีความเป็นผลึกมากขึ้น (Robin *et al.*, 1974; Biliaderis *et al.*, 1981) จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งด้วยเครื่อง x-ray powder diffractometer โครงสร้างผลึกที่พบมีความหนาประมาณ 60 อังสตรอม นอกจากนี้เม็ดแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรด ซึ่งผ่านการตรวจสอบด้วย Gel permeation chromatography พบว่า ประกอบด้วยส่วนหลักๆ อยู่ 2 ส่วน ส่วนแรก คือ กิ่งก้านที่มีขนาด DP เท่ากับ 25 ซึ่งเกิดจากการถูกย่อย ส่วนที่สอง คือ สายโซ่ตรงที่มีขนาด DP เท่ากับ 15 ซึ่งเป็นส่วนที่มีความคงทนต่อการถูกย่อย (Robin *et al.*, 1974) โครงสร้างในส่วนของอสัณฐาน และกิ่งก้านของอะมิโลเพกทินจะอ่อนแอและถูกทำปฏิกิริยาด้วยได้ง่ายกว่าคงเหลือไว้แต่ส่วนที่เป็นผลึก แสดงดังแบบจำลองของ Biliaderis *et al.*, 1981 (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 โครงสร้างภายในเม็ดแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก

ที่มา: Biliaderis *et al.* (1981)

แป้งข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดมีปริมาณอะมิโลสลดลง (Sandhu *et al.*, 2007) เนื่องจากในระยะแรกกรดเข้าทำปฏิกิริยาตรงส่วนออสัญฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงแบบหลวมของเม็ดแป้งก่อน อะมิโลสจะถูกย่อยได้ง่ายกว่าอะมิโลเพกทิน แสดงว่าบริเวณดังกล่าวประกอบด้วยอะมิโลสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเมื่อมีการตัดแปรด้วยกรดเกิดขึ้น ปริมาณอะมิโลสจึงลดลง ซึ่งพบว่าการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด ในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นปริมาณอะมิโลสก็ลดลงเช่นกัน (Atichokudomchai *et al.*, 2000) เช่นเดียวกับหลายงานวิจัยที่พบว่าเมื่อระดับของการตัดแปรเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะเป็นเวลาการทำปฏิกิริยา หรือความเข้มข้นของสารละลายกรด ปริมาณอะมิโลสที่ตรวจพบได้ในแป้งตัดแปรด้วยกรดจะมีปริมาณลดลง (Llano *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2009)

แป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาคีไนเซชันสูงขึ้น ในงานวิจัยของ Singh *et al.* (2009) ตรวจสอบการเกิดเจลลาคีไนเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของแป้งกระเจียบที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีไนเซชันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากส่วนออสัญฐานของแป้งถูกย่อยไปเหลือเพียงส่วนของผลึกที่ทนต่อการถูกย่อยด้วยกรด (Robin *et al.*, 1974) ในขณะที่ยานวิจัยของ Sandhu *et al.* (2007) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวโพดย่อยด้วยกรด สำหรับแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว พบว่า เมื่อมีการตัดแปรด้วยกรดอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีไนเซชันลดลง Jenkin and Donald (1997) ศึกษาผลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เข้มข้น 2.2 โมลาร์ ต่อสมบัติของแป้ง 3 ชนิด (แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว แป้งสาลี และแป้งมันฝรั่ง)

ในสภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่า แป้งดัดแปรที่เตรียมได้มีอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีในเซชันลดลง ขณะที่ช่วงการเกิดเจลลาคีในเซชันกว้างขึ้นเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเข้าไปย่อยในส่วนอสัณฐานทำให้น้ำสามารถเข้าไปถึงส่วนของผลึกได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลลาคีในเซชันลดต่ำลง

แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดจะมีความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งดิบ ดังเช่นในงานวิจัยของ Singh *et al.* (2009) ศึกษาอิทธิพลของการดัดแปรแป้งกระจัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.25, 0.5 และ 1 โมลาร์ เวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องมาจากแป้งที่ผ่านการย่อยมีกำลังการพองตัวลดลงเพราะส่วนอสัณฐานถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้ค่าความแตกต่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ferrini *et al.* (2008) ซึ่งศึกษาความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่า แป้งทั้งสองชนิดมีความหนืดลดลงเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่สภาวะกระบวนการดัดแปรเหมือนกัน (อุณหภูมิและความเข้มข้นกรด) แป้งดัดแปรด้วยกรดมีความหนืดขณะร้อนต่ำ ลักษณะดังกล่าวสามารถบอกด้วยค่าการไหลเทียบกับน้ำ (water fluidity) โดยค่าการไหลเทียบกับน้ำจะเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์ผกผันกับค่าความหนืด กล่าวคือ เมื่อความหนืดต่ำ ค่าการไหลเทียบกับน้ำจะสูง ค่าการไหลเทียบกับน้ำจึงเป็นอีกค่าหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้บอกลักษณะของแป้งย่อยด้วยกรด โดยมีช่วงการบอกค่าอยู่ที่ 0 ถึง 90 (Wurzburg, 1986)

แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดจะมีรีโทรเกรเดชันสูง และได้เจลที่แข็งและทึบแสงเมื่อแป้งเปียกเย็นตัวลง นอกจากนี้แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดยังมีคุณสมบัติในการเกิดฟิล์มที่มีลักษณะแห้ง ยึดเกาะกันได้ดี (Wurzburg, 1986) ในงานวิจัยของ Wang and Wang (2001) ศึกษาสมบัติการเกิดเจลของแป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าว ที่ผ่านการดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.14 นอร์มอล ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่า เจลที่ได้จากแป้งดัดแปรมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยแป้งมันฝรั่งให้เจลที่แข็งที่สุด นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสามารถวัดได้โดยเครื่อง differential scanning calorimeter ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งดัดแปรด้วยกรด ซึ่งเก็บไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร Wang *et al.* (2003) ศึกษาลักษณะของเจลแป้งข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยกรด 3 ระดับ (0.06, 0.14 และ 1.00 นอร์มอล) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างกัน เพื่อให้ได้ความหนืดสูงสุดเท่ากัน กล่าวคือ การดัดแปรที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดน้อยจะต้องใช้เวลาการทำปฏิกิริยามากกว่าการดัดแปรที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดมาก จากการวิจัยพบว่าเจลแป้งข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่ใช้ความเข้มข้นกรดมากที่สุดจะให้เจลแป้งแข็งน้อยที่สุด เนื่องจากโมเลกุลอะมิโลสมีปริมาณลดลงมากที่สุด ที่ระดับการดัดแปรด้วยไฮโดร

คลอริกความเข้มข้นสูงสุด (1.00 นอร์มอล) สำหรับงานวิจัยของ Radley (1976) กลับพบว่า หากความหนืดของแป้งเปียกมีเหมือนกันแล้ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรด ขณะเดียวกันลดเวลาการทำปฏิกิริยาลง เจลที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น การศึกษาคุณสมบัติการ เกิดฟิล์มของแป้งกระจับซึ่งผ่านการดัดแปรด้วยกรด โดย Singh *et al.* (2009) พบว่า ฟิล์มของ แป้งดัดแปร มีความเหนียวและแข็งแรงกว่าแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

แป้งดัดแปรด้วยกรด ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม ชุปกึ่งสำเร็จรูป น้ำสลัด มายองเนส อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้เป็น สารยัดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ เคลือบผิวหน้ากระดาษ ให้เรียบและใช้สำหรับเคลือบเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ให้เส้นด้ายลื่นและมีความยืดหยุ่น (Rohwer and Klem, 1984)

5. แหล่งของแป้งชนิดต่าง ๆ

5.1 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz มีถิ่นกำเนิดใน ตอนกลางของประเทศบราซิล มีชื่อแตกต่างกันตามท้องถิ่น เช่น yucca, tapioca, cassava, mandioca (Shipman, 1967) โดยในทางพฤกษศาสตร์ มันสำปะหลังจัดเป็นพืชในวงศ์ (class) ไบเลียงคู่ (dicotyledoneae) ตระกูล (family) Euphobiaceae (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 12 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้นอายุอยู่ได้หลายปี แต่การเพาะปลูกเกษตรกรรมจะปลูกแบบพืชล้มลุกโดยเก็บเกี่ยวผลผลิตทุกปีเมื่ออายุครบ 8-12 เดือน แต่ในบางครั้งหากภาวะทางเศรษฐกิจไม่ดีอาจเก็บมันสำปะหลังที่อายุมากกว่า 1 ปีได้ เราสามารถแยกพันธุ์มันสำปะหลังต่างๆ ออกจากกันได้จากลักษณะทางพฤกษศาสตร์ที่แตกต่างกันโดยไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน เช่น ลักษณะของรูปทรง การแตกกิ่ง สีก้านใบ สีของลำต้น ลักษณะใบ รูปร่าง และสีของหัว ซึ่งลักษณะต่างๆ เหล่านี้เป็นลักษณะประจำพันธุ์ (เจริญศักดิ์, 2546)

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่สกัดจากหัวมันสำปะหลัง มีแป้งมากกว่าร้อยละ 95 มีปริมาณโปรตีนค่อนข้างต่ำ มีฟอสฟอรัสต่ำกว่าร้อยละ 0.04 ซึ่งเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของแป้งในรูปฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Atichokudomchai and Varavinit, 2003)

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2 ถึง 8 เม็ดมารวมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร แต่ละเม็ดยาว 5 ถึง 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากเป็นรูปไข่ที่มีปลายด้านหนึ่งถูกตัดออก และผิวส่วนที่ตัดออกจะเว้าเข้าข้างในคล้ายรูปปากแตร บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่า ผิวนอกของเม็ดแป้งจะมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ (Sriroth *et al.*, 1999) แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลส อยู่ในช่วงร้อยละ 16-18 มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกเมื่อตรวจสอบด้วย x-ray diffraction มีโครงสร้างทั้งชนิด A และ C แป้งมันสำปะหลังมีช่วงการเกิดเจลที่ในเซชันที่อุณหภูมิ 58-75 องศาเซลเซียส (Moorthy, 2004)

5.2 แป้งเผือก

เผือกที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Colocasia esculenta* (L.) Schott มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หรือตอนใต้ของเอเชียกลาง เผือกมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น taro, dasheen, old cocoyam, talas เผือกจะมีลำต้นใต้ดินไว้สะสมอาหาร มีลักษณะเป็นหัวขนาดใหญ่ รูปทรงกระบอกหรือกลม ปกติมีสีน้ำตาล เป็นพืชเศรษฐกิจระดับท้องถิ่นที่สำคัญ มีผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 2-3.5 ตันต่อไร่ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.), 2544)



ภาพที่ 13 เผือก

แป้งเผือกมีปริมาณไนโตรเจน ร้อยละ 0.014-0.025 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า เม็ดแป้งมีรูปร่างหลายเหลี่ยม และทรงกลม มีขนาด 2-5 ไมโครเมตร x-ray diffraction pattern เป็นชนิด A มีปริมาณอะมิโลส ร้อยละ 16-22 อุณหภูมิในการเกิดเจลที่ในเซชันคือ 70-75 องศาเซลเซียส (Hoover, 2001; Jane *et al.*, 1992; Srichuwong *et al.*, 2005)

5.3 แป้งมันแกว

มันแกวเป็นไม้เถาที่มีการสะสมอาหารที่รากมีลักษณะเป็นหัว เปลือกหัวสีครีมมีถิ่นกำเนิดในเม็กซิโกและอเมริกากลาง มีการปลูกเพื่อจำหน่ายในท้องถิ่น หรือบริโภคในครัวเรือนทั้งใน เม็กซิโกตลอดจนในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และจีน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Pachyrhizus erosus* (L.) Urban มีชื่อเรียกตามแต่ละพื้นเมือง เช่น yam bean, jicama, beng kuang การปลูกมันแกวในประเทศไทยได้ผลผลิต 6.4-14.4 ตันต่อไร่ มันแกวเป็นพืชหัวในกลุ่มของพืชตระกูลถั่วที่มีศักยภาพสำหรับพื้นที่ในเขตร้อนชื้น นำมารับประทานสดกับน้ำสลัด หรือใช้ปรุงอาหารในซุบผัก (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.), 2544)



ภาพที่ 14 มั่นแกว

รูปร่างของเม็ดแป้งมันแกวที่สกัดได้เมื่อดูผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นรูปกลม ขนาดน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบของอะมิโลส ร้อยละ 23-24 มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A และ C แป้งมันแกวเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ 64.5 องศาเซลเซียส (Huang, 2009; Jane *et al.*, 2002; Mélo *et al.*, 1994)

5.4 แป้งกระฉับ

กระฉับเป็นพืชน้ำล้มลุก อยู่ในวงศ์ Trapaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Trapa natan* คนทั่วไปเรียกว่ากระฉับ ซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปในแต่ละท้องถิ่น เช่น water caltrop, water chestnut, singhara nut เป็นต้น ผลมีสีดำ เปลือกแข็งมี 2 เชา ลักษณะเหมือนหน้าวัว เนื้อด้านในมีสีขาว เจริญเติบโตในน้ำ พบได้ในทุกทวีป ทั้งยุโรป อเมริกา แอฟริกา และเอเชีย สำหรับประเทศไทย พบมาก ในจังหวัดสุพรรณบุรี อัญญา อ่างทอง และชัยนาท ผลผลิตประมาณ 0.4 ตันต่อไร่ กระฉับมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 70 ของน้ำหนักแห้ง (Tulyathan *et al.*, 2005; บุญมา, 2550)



ภาพที่ 15 กระจับ

แป้งจากเนื้อกระจับมีลักษณะเป็นรูปกลมค่อนข้างรี มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 13-23 ไมโครเมตร มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ C ประกอบด้วยอะมิโลสร้อยละ 26-40 อุณหภูมิที่แป้งกระจับเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดคือ 76-82 องศาเซลเซียส (Chiang *et al.*, 2007; Tulyathan *et al.*, 2005)

5.5 แป้งเอนซีท



ภาพที่ 16 เอนซีท

เอนซีท มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Ensete Ventricosum* จัดอยู่ในตระกูล musaceae มีลักษณะลำต้นเหมือนกับต้นกล้วย แต่ไม่มีผลกล้วย ปลูกมากทางตอนใต้ และทางตอนใต้ฝั่งตะวันตกของเอธิโอเปีย กระจายไปทั่วทวีปแอฟริกา ส่วนของลำต้นใต้ดิน (corm) จะถูกนำมาใช้สกัดเป็นแป้ง เมื่อตรวจสอบแป้งที่สกัดได้ พบว่า มีรูปร่างเป็นแบบเหลี่ยม และรี ขนาดประมาณ 46 ไมโครเมตร x-ray diffraction pattern เป็นแบบ B มีปริมาณอะมิโลส ร้อยละ 29 การวิเคราะห์

ด้วย Brabender Visco Amylograph ที่ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก พบว่า มีความหนืด 884 BU และมีค่าผลต่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด เท่ากับ +161 BU สำหรับการวัด การเกิดเจลลาทีโนเซชัน ของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC พบว่า ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้าย ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งเอนซีมีค่าเท่ากับ 61.8 และ 71.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีโนส เท่ากับ 21.6 จูลต่อกรัม (Gebre-Mariam and Schmidt, 1996)

5.6 แป้งถั่วเขียว



ภาพที่ 17 ถั่วเขียว

ถั่วเขียวถูกจัดอยู่ใน Phaseolus spp. ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Vigna radiata* ถั่วเขียว ปลูกมากในประเทศปากีสถาน ศรีลังกา บังคลาเทศ และแพร่กระจายไปในเม็กซิโก แคนาดา อเมริกาใต้ และแอฟริกา แป้งถั่วเขียวใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวุ้นเส้นซึ่งมีลักษณะเนื้อใส เส้นมีความสม่ำเสมอ เม็ดแป้งถั่วเขียวที่สกัดได้เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า มีลักษณะค่อนข้างกลมรีคล้ายเม็ดถั่ว ขนาดประมาณ 7-26 ไมโครเมตร ผิวเรียบ เมื่อตรวจสอบ โครงสร้างผลึก พบว่า เป็นแบบ A และ C สำหรับปริมาณอะมิโลส พบว่า มีถึงร้อยละ 39.8 (Jane *et al.*, 1999; Hoover *et al.*, 1997)

5.7 แป้งถั่วหัวช้าง



ภาพที่ 18 ถั่วหัวช้าง

ถั่วหัวช้างมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cicer arietinum* (L.) อยู่ในตระกูล Leguminosae สามารถปลูกในแถบเมดิเตอร์เรเนียน อเมริกาเหนือ และเอเชีย บางแห่งเรียกว่า Chickpea, garbanzo gram หรือ Bengal gram ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งถั่วหัวช้างเมื่อตรวจดูด้วย x-ray diffractometer จะเป็นแบบ C เม็ดแป้งส่วนใหญ่มีขนาด 5-35 ไมโครเมตร ลักษณะกลมและรี แป้งถั่วหัวช้างจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างสูง คือ ร้อยละ 27.2-30.4 (Huang *et al.*, 2007; Hughes *et al.*, 2009; Sandhu and Lim, 2008) แป้งถั่วหัวช้างมีคุณสมบัติในการเกิดเจลที่ในเซชันอยู่ในช่วง 75-77 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดสูงสุด และความหนืดสุดท้าย เท่ากับ 1,107-2,127 และ 1,639-3,250 เซนติพอยท์ (Singh *et al.*, 2004)

แป้งดิบจากพืชเหล่านี้มีคุณสมบัติที่มีลักษณะจำเพาะ เช่น แป้งเผือกและแป้งมันแกว มีขนาดเม็ดแป้งเล็ก ในขณะที่ แป้งกระฉับ แป้งเอนชี่ท แป้งถั่วหัวช้าง มีปริมาณอะมิโลสสูง ทั้งนี้ พืชเหล่านี้มีการผลิตและการใช้ประโยชน์ไม่มากนัก เนื่องจากยังขาดข้อมูลพื้นฐานบางประการ เช่น ด้านรีโอโลยี การรวบรวมข้อมูลด้านสมบัติทางเคมีฟิสิกส์และรีโอโลยี จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากพืชเหล่านี้เพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 คุณลักษณะของแปรงชนิดต่างๆ

แหล่งแปรง	รูปร่าง	ขนาด (ไมโครเมตร)	โครงสร้างผลึก	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	ที่มา
มันสำปะหลัง	กลม, รี	12-15	A, C	16-18	Sriroth <i>et al.</i> , 1999; Moorthy, 2004
ฝือก	ทรงกระบอก, กลม	2-5	A	16-22	Jane <i>et al.</i> , 1992; Hoover, 2001; Srichuwong <i>et al.</i> , 2005
มันแกว	กลม	<10	A, C	23-24	Mélo <i>et al.</i> , 1994; Jane <i>et al.</i> , 2002; Huang, 2009
กระเจี๊ยบ	รี	13-23	A, C	26-40	Tulyathan <i>et al.</i> , 2005; Chiang <i>et al.</i> , 2007
เอนซีท	รูปเหลี่ยม, รี	46	B	29	Gebre-Mariam and Schmidt, 1996
ถั่วเขียว	กลม, รี	7-26	A, C	39.8	Hoover <i>et al.</i> , 1997; Jane <i>et al.</i> , 1999
ถั่วหัวช้าง	กลม, รี	5-35	C	27.2-30.4	Huang <i>et al.</i> , 2007; Hughes <i>et al.</i> , 2009; Sandhu and Lim, 2008

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

- 1.1 แป้งมันสำปะหลังจาก บริษัทสงวนวงษ์ อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา
- 1.2 แป้งถั่วเขียวจากตลาดในประเทศไทย
- 1.3 แป้งถั่วหัวช้างจากตลาดในประเทศไทย
- 1.4 แป้งกระเจี๊ยบจากตลาดในประเทศเวียดนาม
- 1.5 แป้งเอนชี่ทจากตลาดในประเทศเอธิโอเปีย
- 1.6 เผือกซื้อจากตลาดไทย
- 1.7 มันแกวซื้อจากตลาดไทย

2. สารเคมี

- 2.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
- 2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)
- 2.3 สารละลายไอโอดีน (Iodine solution)
- 2.4 เอนไซม์ไอโซอะมิเลสจากเชื้อ *Pseudomonas amyloclavata* (Pseudomonas isoamylase (Hayashibara Biochemical Laboratories, Inc., Okayama, Japan))
- 2.5 เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส จากเชื้อ *Aspergillus niger* (Megazyme, Ireland)
- 2.6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer) โดยสารเคมีที่ใช้ในการทดลองดังกล่าว อยู่ในระดับ Reagent grade

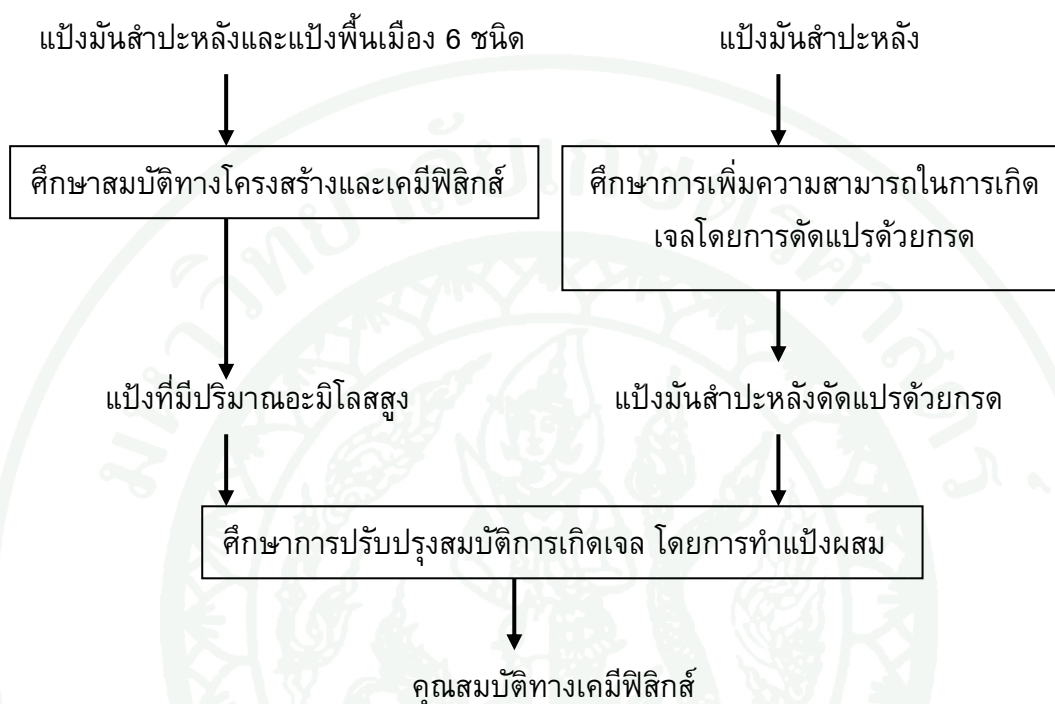
3. เครื่องมือ

- 3.1 เครื่องวัด pH (pH meter, Horiba F-23, Japan)
- 3.2 มอเตอร์สำหรับกวน (Stirring motor, IKA Labortechnik, Germany)
- 3.3 อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath, WB 14, Germany)
- 3.4 ตู้อบไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven, UM 500, Germany)
- 3.5 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, Joel JSM 5310, England)

- 3.6 เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบเลเซอร์ (Particle size analysis laser diffraction, Malvern, Mastersizer, UK)
- 3.7 เครื่อง X-ray diffractometer (X-ray diffractometer, Bruker AXS D5005, Germany)
- 3.8 เครื่อง Automatic amperometric Titrator (835 Titrand, Metrohm, Herisau, Switzerland)
- 3.9 เครื่อง High Performance Anion Exchange Chromatography ที่มีดีเทคเตอร์ชนิด Pulsed Amperometric Detector (HPAEC-PAD) (Dionex, DX-120, Sunnyvale, CA)
- 3.10 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 7 Perkin Elmer, USA)
- 3.11 เครื่องวัดความหนืดแป้ง (Rapid Visco Analyzer, RVA 4D, Newport Scientific, Australia)
- 3.12 เครื่อง Rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany)
- 3.13 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA.XT plus, Stable Micro System, UK)
- 3.14 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer, RVDA-II, Stoughton, MA, USA)
- 3.15 เครื่องบดแป้ง (Laboratory mill, Perten 3100, Sweden)
- 3.16 ตะแกรงร่อนขนาด 90 ไมโครเมตร
- 3.17 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Sigma 2K 15, Germany)
- 3.18 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (ประกอบด้วย Kjeltac system 1026 Distilling unit และ 2006 Digestor, Tecator, Sweden)
- 3.19 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (ประกอบด้วย Sotex system HT 1046 Service unit และ Sotex system HT2 1045 Extraction unit, Tecator, Sweden)
- 3.20 เตาเผาไฟฟ้าที่ปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ (Electric Muffle Furnace, Carbolite, England)
- 3.21 อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิพร้อมเครื่องเขย่า (Shaker waterbath, Polyscience, USA)
- 3.22 เครื่องวัดความหนืด (Thomas-Stormer Viscometer, 9730 F10, USA)
- 3.23 เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์

วิธีการ

1. ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 19 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

2. การเตรียมแป้ง

นำหัวสด (เผือก มันแกว) ล้างน้ำทำความสะอาด ปอกเปลือกออก จากนั้นหั่นหัวสดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปปั่นละเอียดกับน้ำ ในอัตราส่วนหัวสดต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 2 นำตัวอย่างที่ได้กรองด้วยผ้าขาวบาง และผ่านตะแกรงร่อนขนาด 170 เมช (90 ไมโครเมตร) และทิ้งส่วนที่เป็นกาก แสงส่วนที่กรองได้ในภาชนะนาน 2 ชั่วโมง แป้งมันแกวจะตกตะกอนอยู่ก้นภาชนะ เมื่อครบเวลาเทน้ำส่วนบนทิ้ง เติมน้ำในแป้งที่ตกตะกอน คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วเทน้ำส่วนบนทิ้ง ทำเช่นนี้อีก 2 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำส่วนบนใส สำหรับแป้งเผือก นำหัวสดไปปั่นละเอียดกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ แล้วนำน้ำแป้งที่ได้มาตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ทำเช่นนี้จนกระทั่งน้ำส่วนบนใส จากนั้นล้างแป้งที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง นำแป้งที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบดและผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เพื่อทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

ในกรณีแบ่งทางการค้าที่ได้ จะนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เพื่อตรวจสอบความบริสุทธิ์ของแป้ง โดยการวิเคราะห์สิ่งเจือปน สำหรับแป้งกระเจี๊ยบ หลังผ่านการวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณโปรตีนสูง (มากกว่า 0.5 %) จึงนำไปล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ก่อนนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางโครงสร้าง และสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง

3.1 องค์ประกอบทางเคมี (ภาคผนวก ข้อ 1, 2 และ 3)

องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีนในรูปปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วยวิธีเจดาห์ล (Kjeldahl) (ใช้แฟคเตอร์ 6.25) ปริมาณไขมันโดยการสกัดด้วยสารละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ และปริมาณเถ้าของแป้งโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตามวิธีการของ AOAC (1990)

3.2 ลักษณะ birefringence ภายใต้แสงโพลาไรซ์

ตรวจสอบลักษณะ birefringence เม็ดแป้งโดยนำแป้งมากระจายตัวบนแผ่นสไลด์ด้วยสารละลายกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 80 และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์เทียบกับลักษณะเม็ดแป้งจากกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดาที่กำลังขยาย 50 เท่า

3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (ภาคผนวก ข้อ 4)

ตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, Joel JSM 5310, England) โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 1,000 เท่า ตามวิธีของ Walker (1976)

3.4 ขนาดและการกระจายตัวของแป้ง

วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของแป้งด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบเลเซอร์ (Particle size analysis laser diffraction, Malvern, Mastersizer) โดยทำการวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคทันทีหลังจากเตรียมตัวอย่าง ทำการเจือจางตัวอย่างทุกตัวอย่างด้วยน้ำและกำหนดค่า refractive index ของน้ำเท่ากับ 1.33 โดยค่าที่แสดงในการวัดขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคในการทดลองนี้คือ ค่า D (v,0.5)

3.5 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง (ภาคผนวก ข้อ 5)

วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง x-ray powder diffractometer ที่ช่วง 4 ถึง 38 องศา 2-theta ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา 2-theta ต่อนาที

3.6 ปริมาณอะมิโลส (ภาคผนวก ข้อ 6)

วิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสโดยวิธีการทำปฏิกิริยากับไอโอดีนซึ่งใช้เครื่อง automatic amperometric titrator โดยคำนวณปริมาณอะมิโลสจาก Iodine affinity ที่ร้อยละ 20 ตามวิธีของ Takeda *et al.* (1987)

3.7 การกระจายตัวของสายโซ่ (ภาคผนวก ข้อ 7)

วิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่ที่เป็นองค์ประกอบของแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยพันธะกิ่งโดยใช้ Ion exchange chromatography ด้วยเครื่อง High performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์ แบบ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD) โดยใช้คอลัมน์ Carbowac PA 100 (250X4 mm.) ตามวิธีของ Bertoff (2004)

3.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืด (ภาคผนวก ข้อ 8)

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA 4, Newport Scientific, Australia) โดยชั่งแป้งตัวอย่าง 3 กรัม (ที่ความชื้นร้อยละ 14) ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ น้ำหนักรวม 28 กรัม ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืด ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 95 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิลงมาที่ 50 องศาเซลเซียส ตรวจวัดค่า

3.9 ลักษณะการเกิดเจลที่ไนเซชัน (ภาคผนวก ข้อ 9)

วิเคราะห์การเกิดเจลที่ไนเซชันของแป้งความเข้มข้นร้อยละ 25 ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 105 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (Onset temperature, T_{OG}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_{PG}) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (Conclusion temperature, T_{CG}) และช่วงของอุณหภูมิ (temperature range, $T_{CG}-T_{OG}$) ของการเกิดเจลที่ไนเซชัน หน่วยเป็นองศาเซลเซียส และพลังงานที่เปลี่ยนแปลง (enthalpy, ΔH_G) หน่วยเป็นจูลต่อกรัม

3.10 ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชัน (ภาคผนวก ข้อ 10)

ตัวอย่างที่ผ่านการทดลองการเกิดเจลที่ไนเซชันแล้วมาบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 4 องศาเซลเซียส ในเวลา 15 วัน ตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยใช้เครื่อง DSC ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 105 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature, T_{OR}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_{PR}) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature, T_{CR}) ของการเกิดรีโทรเกรเดชัน หน่วยเป็นองศาเซลเซียส พลังงานที่เปลี่ยนแปลง (enthalpy, ΔH_R) หน่วยเป็นจูลต่อกรัม และร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (% Retrogradation, %R)

3.11 สมบัติวัฏภาคการไหล (ภาคผนวก ข้อ 11)

วิเคราะห์วัฏภาคการไหลด้วยเครื่อง Rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany) โดยนำสารละลายแป้งในน้ำกลั่น ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มาทดสอบทางด้าน Oscillatory test ด้วยการทำ Temperature sweep ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิลงจาก 95 ถึง 25 องศาเซลเซียส กำหนดความถี่เท่ากับ 1 Hz และความเครียด (strain) เท่ากับ 0.5% และทำ Frequency sweep กำหนดความถี่ 0.1 ถึง 20 Hz ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความเครียด (strain) เท่ากับ 0.5% โดยใช้หัวกดแบบ parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กำหนดขนาดช่องว่างสำหรับใส่ตัวอย่าง (gap size) เท่ากับ 1,000 μm

3.12 วิเคราะห์ degree of enzyme hydrolysis (ภาคผนวก ข้อ 12)

วิเคราะห์ degree of enzyme hydrolysis ตามวิธีของ Miao *et al.* (2009) โดยชั่งแป้ง 200 มิลลิกรัม ละลายในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.2 โมลาร์ แล้วเติมเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส ก่อนนำไปเขย่าในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส โดยเก็บตัวอย่างทุก 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที นำมาวิเคราะห์ปริมาณกลูโคสด้วยชุดทดสอบ (oxidase-peroxidase assay kit, Megazyme)

4. การตัดแปรงด้วยกรด

เตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง ควบคุมอุณหภูมิของน้ำแป้งในระหว่างการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (1 ถึง 7 ชั่วโมง) มากรองสารละลายกรดออก ส่วนแป้งที่ได้นำมาปรับความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำแป้งให้อยู่ระหว่าง 6.0-6.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 กรองและล้างแป้ง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส บดแล้วบรรจุลงในภาชนะปิด

5. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งตัดแปรงด้วยกรด

5.1 ค่าความหนืดขณะร้อนด้วย Brookfield viscometer (ภาคผนวก ข้อ 13)

วิเคราะห์ความหนืดน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Brookfield viscometer หัวเข็มหมายเลข 31 (spindle number) โดยใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

5.2 ค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) (ภาคผนวก ข้อ 14)

วิเคราะห์ค่าการไหลเทียบกับน้ำ ตามวิธีของ Hanchatt *et al.* (2002) ด้วยเครื่อง Thomas Stormer Viscometer ที่ช่วงอุณหภูมิ 81- 83 องศาเซลเซียส บันทึกเวลาใช้ในการหมุนให้ครบ 100 รอบ

5.3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัว (ภาคผนวก ข้อ 15)

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA จัดแปลงจากวิธีของ Hanchett *et al.* (2002) โดยใช้ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

5.4 สมบัติวัฏภาคการไหล

วิเคราะห์สมบัติวัฏภาคการไหลด้วยเครื่อง Rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany) เช่นเดียวกับข้อ 3.11 โดยใช้ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

5.5 สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส (ภาคผนวก ข้อ 16)

เตรียมเจลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สูง 15 มิลลิเมตร โดยใช้ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 10 ทำการวัดสมบัติเนื้อสัมผัสโดยเครื่อง Texture Analyzer, TA.XT plus, Stable Micro System, UK ด้วยโปรแกรม Texture Profile Analysis (TPA) ที่ร้อยละ deformation เท่ากับ 25 และใช้ความเร็วของหัวกดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที และบันทึกข้อมูลระหว่างแรงกด (กรัม) กับเวลา (วินาที) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าความแข็ง (Hardness) ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ความยืดหยุ่น (Springiness) และความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess)

6. การวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของแป้งผสม

6.1 การเตรียมตัวอย่าง

ในการทดลองครั้งนี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติของเจลแป้งผสมที่เกิดจากการผสมของแต่ละชนิด ได้แก่ 1) แป้งมันสำปะหลังดิบ 2) แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดระดับที่ 1 (ค่าการไหลเทียบกับน้ำ, water fluidity เท่ากับ 50 (WF 50)) 3) แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดระดับที่ 2 (ค่าการไหลเทียบกับน้ำ, water fluidity เท่ากับ 60 (WF 60)) 4) แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดระดับที่ 3 (ค่าการไหลเทียบกับน้ำ, water fluidity เท่ากับ 70 (WF 70)) 5) แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดระดับที่ 4 (ค่าการไหลเทียบกับน้ำ, water fluidity เท่ากับ 80 (WF 80)) กับแป้งถั่วหัวช้างหรือแป้งถั่วเขียว โดยเตรียมสารที่มีความเข้มข้นรวมของระบบเท่ากับ

ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนของแป้งหัวช้างหรือแป้งหัวเขียวในระบบเท่ากับ ร้อยละ 25, 50 และ 75

6.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวลง

นำสารละลายที่เตรียมได้จากวิธีข้อ 6.1 ตามอัตราส่วนที่ต้องการให้ได้น้ำหนักรวม 28 กรัม ใช้เครื่อง RVA เช่นเดียวกับข้อ 5.3

6.3 สมบัติวิทยาการไหล

นำสารละลายที่เตรียมได้จากวิธีข้อ 6.1 ตามอัตราส่วนที่ต้องการใช้เครื่อง Rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany) เช่นเดียวกับข้อ 3.11

6.4 สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส

สารละลายที่เตรียมได้จากวิธีข้อ 6.1 ตามอัตราส่วนที่ต้องการ ทำการวัดสมบัติเนื้อสัมผัสโดยเครื่อง Texture Analyzer, TA.XT plus, Stable Micro System, UK เช่นเดียวกับข้อ 5.5

7. การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การทดลองทั้งหมดใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแป้งชนิดต่างๆ กับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ที่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยใช้เทคนิค Principle Component Analysis (PCA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ XLSTAT เวอร์ชัน 2007

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งย่อยด้วยกรดและแป้งผสมจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete Randomized Design, CRD)

และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

8. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบัน
ค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาในการทำวิจัย

ระยะเวลาในการทำวิจัยเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2552 ถึงเดือนกันยายน 2554

ผลและวิจารณ์

1. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่าง ๆ

1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแป้งแต่ละชนิด แป้งทั้งหมดมีปริมาณโปรตีนในช่วงร้อยละ 0.08-0.22 ปริมาณไขมันและเถ้ามีค่าในช่วงร้อยละ 0.00-0.25 และร้อยละ 0.01-0.26 ตามลำดับ ร้อยละขององค์ประกอบอื่นๆ โดยรวมดังกล่าวไม่ถึงร้อยละ 1 ดังนั้นแป้งที่เตรียมได้ในการศึกษานี้จัดว่าเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์ (starch)

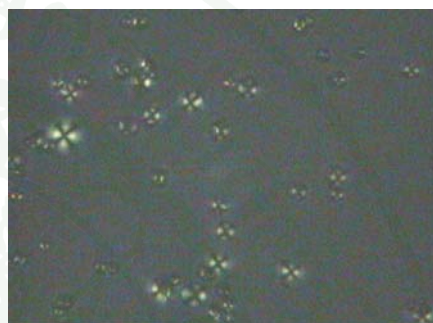
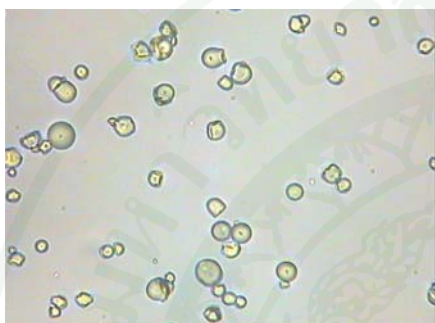
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ ¹

ชนิดแป้ง	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)
มันสำปะหลัง	0.13 ± 0.00 ^{bcd}	0.18 ± 0.04 ^b	0.26 ± 0.00 ^a
เผือก	0.17 ± 0.01 ^{abc}	0.18 ± 0.01 ^b	0.11 ± 0.01 ^e
มันแกว	0.08 ± 0.06 ^d	0.15 ± 0.03 ^b	0.04 ± 0.01 ^f
กระเจี๊ยบ	0.22 ± 0.00 ^a	0.00 ± 0.00 ^c	0.22 ± 0.00 ^b
เอนซีท	0.20 ± 0.00 ^{ab}	0.00 ± 0.00 ^c	0.21 ± 0.00 ^c
ถั่วเขียว	0.09 ± 0.00 ^{cd}	0.25 ± 0.01 ^a	0.01 ± 0.00 ^g
ถั่วหัวช้าง	0.20 ± 0.05 ^{ab}	0.00 ± 0.00 ^c	0.16 ± 0.01 ^d

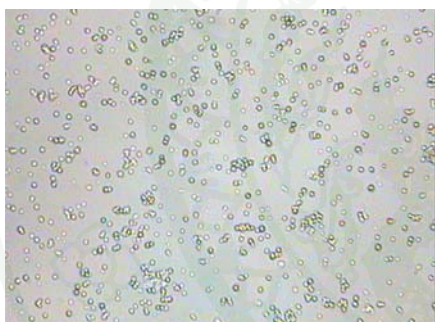
หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและคำร้อยละการกระจายตัวของเม็ดแป้ง

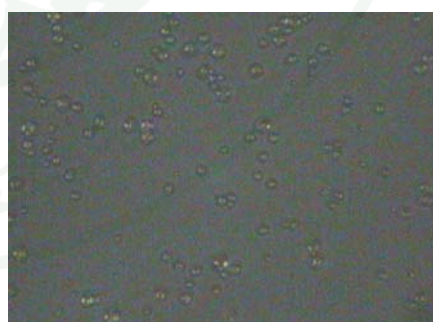
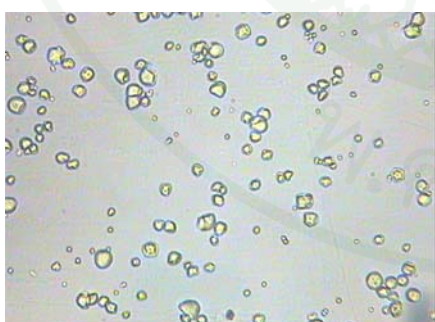
เมื่อนำแป้งทั้ง 7 ชนิดมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดาที่ กำลังขยาย 50 เท่าแสดงดังภาพที่ 20 (ภาพซ้าย) พบว่ามีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง และเมื่อวิเคราะห์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ เม็ดแป้งมีสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบโพลาไรซ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ามีโครงสร้างแบบ birefringence ดังภาพที่ 20 (ภาพขวา)



แป้งมันสำปะหลัง

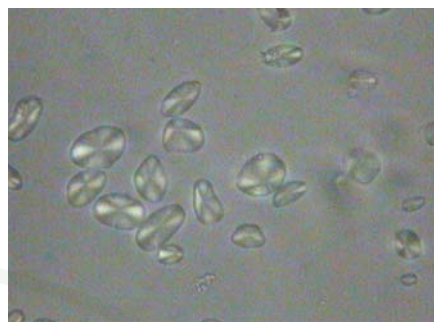


แป้งเผือก



แป้งมันแกว

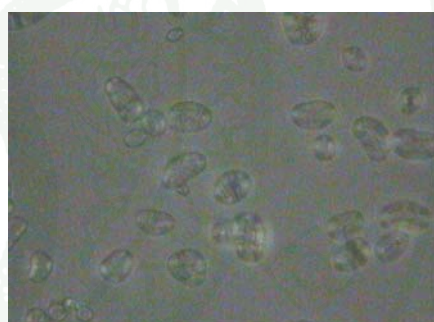
ภาพที่ 20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งชนิดต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา (ภาพซ้าย) เปรียบเทียบกับลักษณะ birefringence ของเม็ดแป้งจากกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์ (ภาพขวา) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



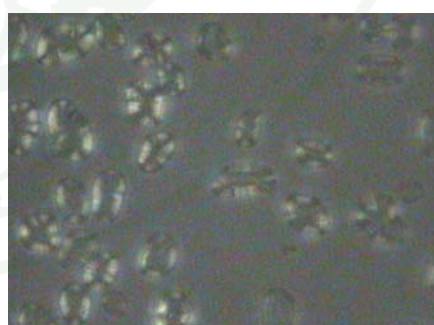
เมล็ดกระเจียว



เมล็ดเอนซีท



เมล็ดถั่วเขียว

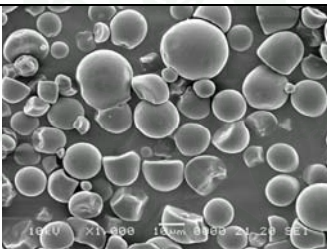
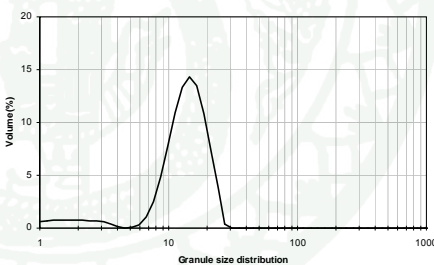
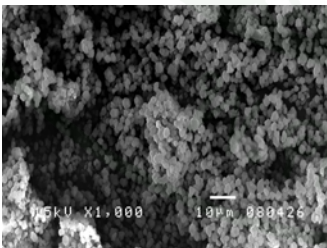
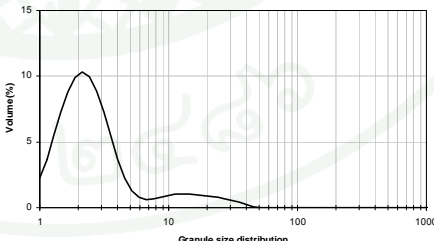


เมล็ดหัวช้าง

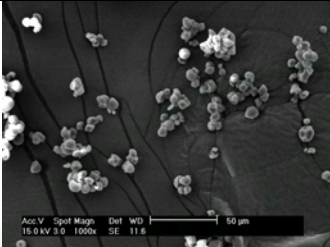
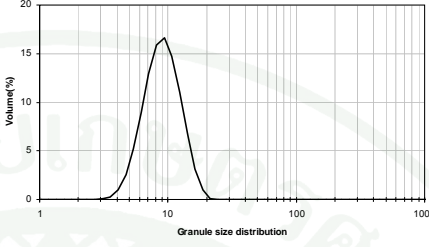
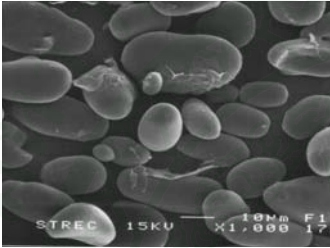
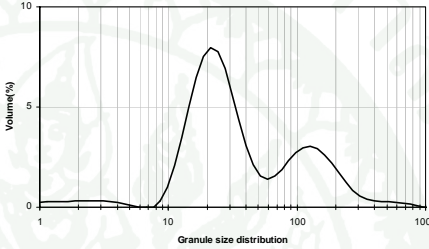
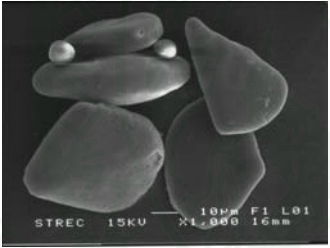
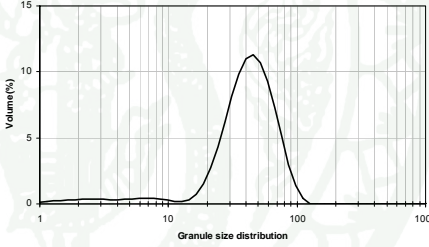
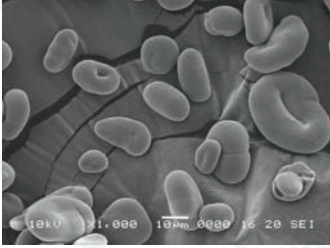
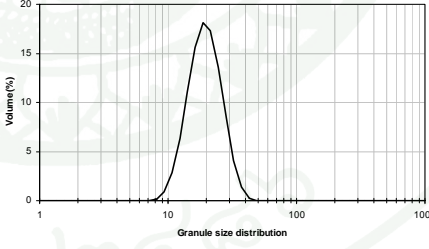
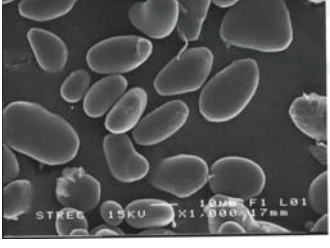
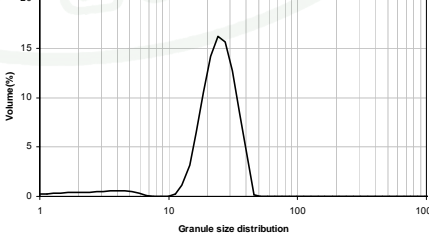
ภาพที่ 20 (ต่อ)

ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งทั้ง 7 ชนิด เมื่อวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 6 มีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง แป้งเผือกมีขนาดเม็ดเล็กที่สุด โดยมีขนาดแป้งเฉลี่ยอยู่ที่ 2.3 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นหลายเหลี่ยม แป้งมันแกวมียขนาดใหญ่มากกว่าแป้งเผือกไม่มากนัก โดยมีขนาดเม็ดแป้งเฉลี่ยเท่ากับ 9.4 ไมโครเมตร ลักษณะรูปร่างเป็นแบบทรงกลม ส่วนแป้งเอนซีทมีขนาดเม็ดแป้งใหญ่ที่สุด โดยมีขนาดเม็ดแป้งเฉลี่ยเท่ากับ 44.8 ไมโครเมตร ซึ่งมีรูปร่างเป็นแบบเหลี่ยม สำหรับแป้งกระจับ แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง ซึ่งมีลักษณะและขนาดของเม็ดแป้งใกล้เคียงกันมาก กล่าวคือ มีลักษณะรูปร่างกลมและรี โดยมีขนาดเม็ดแป้งอยู่ที่ 23.4, 18.7 และ 25.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งและขนาดที่ตรวจวัดได้ของแป้งแต่ละชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกับการศึกษาก่อนหน้านี้ (Jane *et al.*, 1992 ; Mélo *et al.*, 1994; Gebre-Mariam and Schmidt, 1996; Hoover *et al.*, 1997; Chiang *et al.*, 2007; Sandhu and Lim, 2008)

ตารางที่ 6 ลักษณะของสัณฐานวิทยา และขนาดของแป้งชนิดต่างๆ

แหล่ง แป้ง	สัณฐานวิทยา ¹	การกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้ง(ร้อยละ)	ขนาด ² (ไมโครเมตร)
มัน สำปะหลัง			14.5 ± 0.0^b
เผือก			2.3 ± 0.0^c

ตารางที่ 6 (ต่อ)

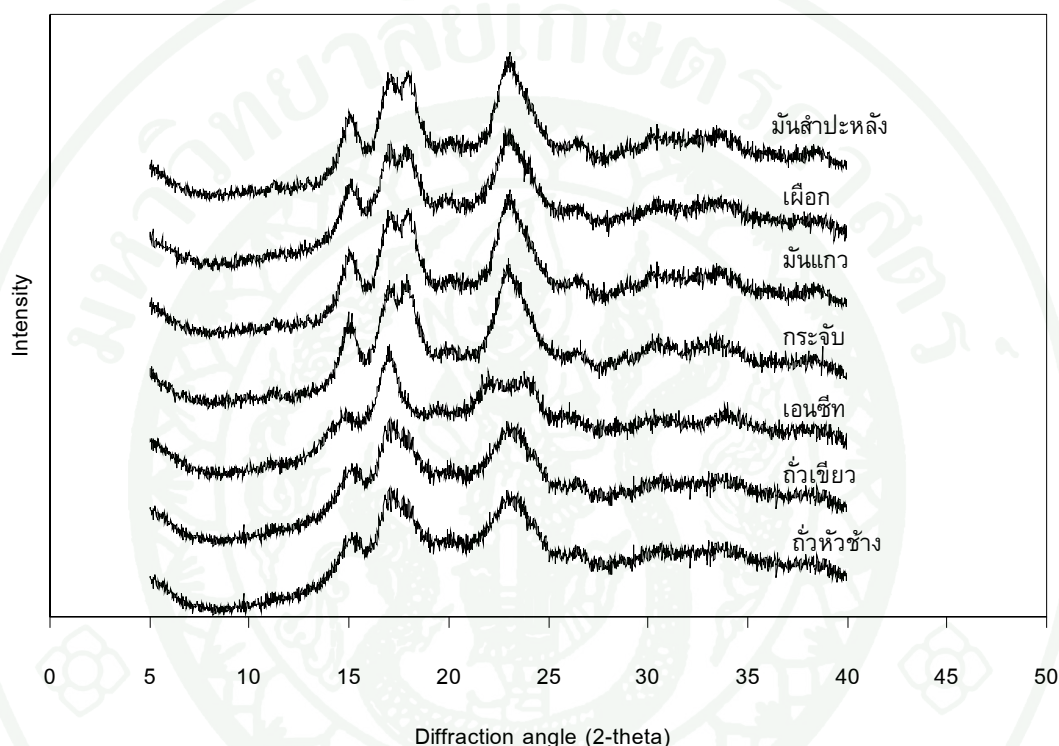
แหล่ง แป้ง	สัณฐานวิทยา ¹	การกระจายตัวของขนาดเม็ดแป้ง(ร้อยละ)	ขนาด ² (ไมโครเมตร)
มันแกว			9.4 ± 0.0^c
กระเจ็บ			23.4 ± 0.0^b
เอนไซท์			44.8 ± 0.1^a
ถั่วเขียว			18.7 ± 0.0^b
ถั่ว หัวช้าง			25.6 ± 0.1^b

หมายเหตุ ¹ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1000 เท่า

² ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง

ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก แป้งมันแกว แป้งกระจับ แป้งเอนชิต แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง ศึกษาได้จากรูปแบบของ x-ray diffraction แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่า แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก แป้งมันแกว และแป้งกระจับ จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ A ขณะที่แป้งเอนชิต จัดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ B แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C โดยทั่วไปจะพบในพืชตระกูลถั่ว ซึ่งแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วหัวช้าง มีลักษณะโครงสร้างผลึกดังกล่าว เช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Hoover *et al.* (1997); Gebre-Mariam and Schmidt (1996); Mélo *et al.* (1994); Sandhu and Lim (2008); Srichuwong *et al.* (2005) โครงสร้างผลึกแบบ C จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกผสมกันระหว่างผลึก A และ B โดยมีลักษณะเป็น C_A หรือ C_B (Hizukuri, 1996) ดังนั้นแป้งบางชนิดอาจให้โครงสร้างผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งกระจับตรวจพบผลึกเป็นแบบ C (Tulyathan *et al.*, 2005; Jane *et al.*, 1999) แป้งถั่วเขียวตรวจพบผลึกเป็นแบบ A (Jane *et al.*, 1999) และแป้งมันแกว

ตรวจพบผลึกเป็นแบบ C (Jane *et al.*, 2002) โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับถิ่นกำเนิดและสภาวะแวดล้อมที่ปลูก กล่าวคืออุณหภูมิในระหว่างการปลูกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลึกแบบ C ซึ่งเป็นผลึกที่มีโครงสร้างผสมระหว่าง A และ B เปลี่ยนเป็นผลึกแบบ A (Hizukuri, 1985)

1.4 อะมิโลสและการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่มีอยู่ในแป้งทั้ง 7 ชนิดโดยทำปฏิกิริยากับไอโอดีนตามวิธีการของ Takeda *et al.* (1987) ผลแสดงดังตารางที่ 7 แป้งถั่วหัวช้างมีปริมาณอะมิโลสสูงที่สุด ขณะเดียวกันแป้งเผือกมีปริมาณอะมิโลสต่ำที่สุด โดยมีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 35.6 และ 7.9 ตามลำดับ ซึ่งแป้งแต่ละชนิดมีปริมาณอะมิโลส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสำหรับแป้งเผือกมีปริมาณอะมิโลสต่ำกว่างานวิจัยของ Lu *et al.*, (2008) แสดงให้เห็นว่าปริมาณอะมิโลสที่ไม่คงที่มีผลมาจากคุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการสกัดแป้งที่แตกต่าง โดยพบว่าพันธุ์พืช ฤดูกาลปลูก และเวลาการเจริญเติบโตเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของวัตถุดิบ มีรายงานว่าเผือกสายพันธุ์เดียวกันปลูกใน 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูหนาว และฤดูใบไม้ผลิ พบว่ามีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 13.4, 11.3 และ 10.2 ตามลำดับ ในขณะที่เผือกสายพันธุ์ต่างกัน เมื่อปลูกในสภาวะแวดล้อมเดียวกันจะมีปริมาณอะมิโลสต่างกัน (Lu *et al.*, 2008; Jane *et al.*, 1992) นอกจากนี้วัตถุดิบที่เก็บเกี่ยวเมื่ออายุต่างกันจะมีปริมาณอะมิโลสต่างกัน ซึ่งพบในกระเจี๊ยบที่เก็บเมื่ออายุ 42 วัน (ร้อยละ 40.2) จะมีปริมาณอะมิโลสสูงกว่าการเก็บที่ 14 วัน (ร้อยละ 26.3) (Chiang *et al.*, 2007)

ลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทินมีความสำคัญและมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง แป้งจากพืชแต่ละชนิดจะมีการกระจายตัวของอะมิโลเพกทินเฉพาะตัว (Jane *et al.*, 1999) การกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทิน แสดงดังตารางที่ 7 แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว มีร้อยละการกระจายตัวของสาย A ซึ่งเป็นสายโซ่ขนาดสั้น (short A chain: DP 6-12) มากที่สุด (ร้อยละ 24.68-27.66) และร้อยละการกระจายตัวของสาย B3+ ซึ่งเป็นสายโซ่ขนาดยาว (long branch chain: DP \geq 37) น้อย (ร้อยละ 7.51-9.63) แต่พบมากที่สุดในแป้งถั่วหัวช้าง โดยมีร้อยละการกระจายตัวเท่ากับ 11.88 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Jane *et al.*, 2002; Lu *et al.*, 2008; Hughes *et al.*, 2009) ขณะที่ร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทินที่พบในแป้งกระเจี๊ยบและแป้งถั่วเขียวมีความแตกต่างจากงานวิจัยของ Jane *et al.* (1999) กล่าวคือ ร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่ขนาดยาว (long

branch chain: $DP \geq 37$) ที่ตรวจสอบได้ในอะมิโลเพกทินของแป้งชนิดอื่นๆ มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้ อาจเป็นแหล่งของพืช ฤดูกาลปลูก สภาวะแวดล้อมในการเจริญเติบโต รวมถึงการวิเคราะห์

Tester *et al.* (2004) รายงานว่าสายโซ่ที่มีขนาดสั้นที่มี DP 12-24 เป็นกลุ่มของอะมิโลเพกทินที่จับเป็นกลุ่มเกิดเป็นเกลียวคู่ (double helices) ในเม็ดแป้งดิบ ประกอบไปด้วยสาย A และสาย B มีผลต่อลักษณะโครงสร้างผลึก จากการทดลองพบว่าแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ A ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว จะมีปริมาณการกระจายตัวของสายโซ่ขนาดสั้น (short A chain: DP 6-12) มากกว่าแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ B และแบบ C ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณการกระจายตัวของสายโซ่มีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างผลึกซึ่งสามารถใช้จำแนกแป้งตามโครงสร้างผลึกได้ (Hizukuri, 1985)

ตารางที่ 7 ปริมาณอะมิโลสและการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทิน^{1,2}

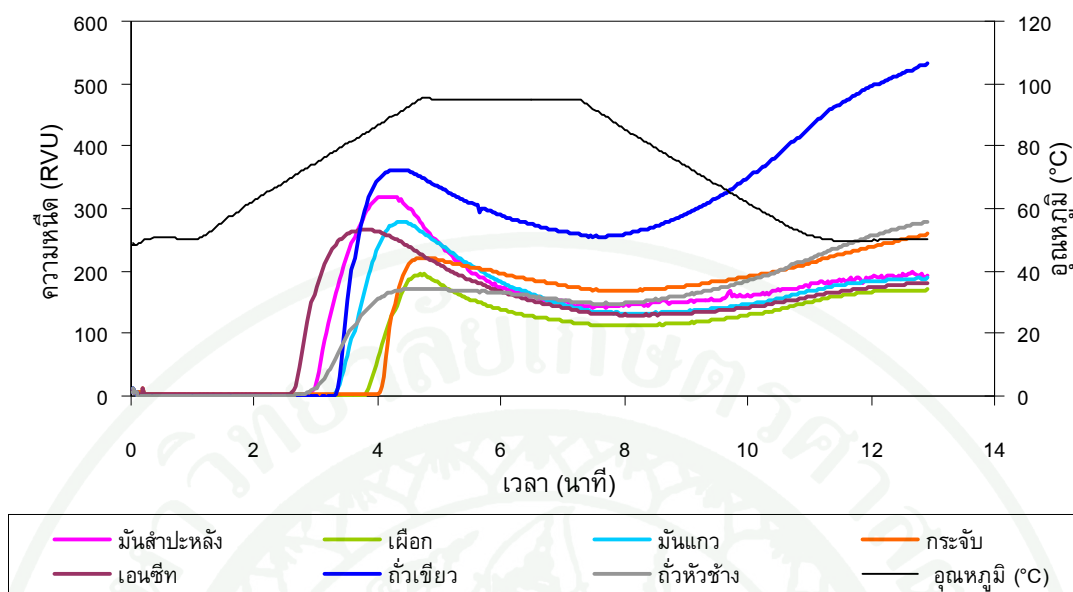
ชนิดแป้ง	อะมิโลส (ร้อยละ)	การกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทิน (ร้อยละ)			
		DP6-12	DP13-24	DP25-36	DP \geq 37
มันสำปะหลัง	17.44 \pm 0.55 ^d	27.66 \pm 0.25 ^a	50.35 \pm 0.92 ^c	12.36 \pm 0.19 ^d	9.63 \pm 0.98 ^{abc}
เผือก	7.91 \pm 0.17 ^f	24.68 \pm 0.77 ^b	55.04 \pm 2.52 ^a	11.55 \pm 0.23 ^e	8.73 \pm 3.06 ^{bcd}
มันแกว	14.15 \pm 0.90 ^e	26.63 \pm 0.27 ^a	51.93 \pm 0.79 ^{bc}	13.93 \pm 0.26 ^c	7.51 \pm 0.80 ^{cd}
กระเจ็บ	19.20 \pm 0.17 ^{cd}	19.78 \pm 0.54 ^d	56.42 \pm 0.48 ^a	14.60 \pm 0.20 ^{bc}	9.20 \pm 0.26 ^{abcd}
เอนซีท	20.85 \pm 1.70 ^c	23.85 \pm 1.18 ^{bc}	54.43 \pm 1.66 ^{ab}	10.40 \pm 0.41 ^f	11.31 \pm 0.07 ^{ab}
ถั่วเขียว	28.47 \pm 0.80 ^b	22.92 \pm 0.08 ^c	55.19 \pm 0.75 ^a	15.26 \pm 0.46 ^b	6.63 \pm 0.37 ^d
ถั่วหัวช้าง	35.59 \pm 0.28 ^a	19.35 \pm 0.07 ^d	49.77 \pm 0.10 ^c	19.00 \pm 0.01 ^a	11.88 \pm 0.16 ^a

หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² DP, degree of polymerization

1.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำแล้วพองตัวและบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา ส่วนผสมของน้ำแป้งจะกลายเป็นแป้งเปียก ซึ่งมีความหนืดมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Rapid Visco Analyzer (RVA)

อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ของแป้งเอนชิตซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดใหญ่ มีค่าเท่ากับ 69.80 องศาเซลเซียส ในขณะที่แป้งเผือกซึ่งเป็นเม็ดแป้งขนาดเล็ก มีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ 82.35 องศาเซลเซียส ขณะเดียวกันมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำ (197 RVU) ดังตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาขนาดของเม็ดแป้งกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนืดสูงสุด พบว่าเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กจะมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงและความหนืดสูงสุดต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่มีขนาดใหญ่ (Huang, 2006)

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) พบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีความหนืดสูงสุดต่ำ (ความหนืดสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 200 RVU) โดยพบว่าแป้งกลุ่มนี้คือ แป้งเผือกและแป้งถั่วหัวช้าง สำหรับกลุ่มที่ 2 คือแป้งที่มีความหนืดสูงปานกลาง (ความหนืดสูงสุดมีค่าระหว่าง 200-300 RVU) คือ แป้งมันแกว แป้งเอนชิต และแป้งกระจับ กลุ่มที่มีค่าความหนืดสูงสุดสูง (ความหนืดสูงสุดมีค่ามากกว่า 300 RVU) คือ แป้งถั่วเขียว และแป้งมันสำปะหลัง โดยค่าความหนืดสูงสุดของแป้งทั้ง 3 กลุ่ม สอดคล้องกับค่าวิเคราะห์ที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Hung and Morita, 2005; Sandhu and Lim, 2008; Tetchi *et al.*, 2007) ขณะที่ค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) ซึ่งบอกถึงความสามารถในความทนทานต่ออุณหภูมิและการกวน พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่าความ

แตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดสูงที่สุด เมื่อพิจารณาปริมาณอะมิโลสกับค่าความความหนืดสูงสุดและค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด พบว่ามีความสัมพันธ์แบบผกผันกันโดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสมากจะมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดมีค่าต่ำ (Jane *et al.*, 1999) เช่น แป้งถั่วหัวช้าง ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสน้อยกว่าแป้งถั่วหัวช้างจึงมีค่าความความหนืดสูงสุดและค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดมีค่าสูง ในกรณีของแป้งถั่วเขียวถึงแม้มีปริมาณอะมิโลสใกล้เคียงกับแป้งถั่วหัวช้างแต่ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าสูงกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของอะมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 7)

เมื่อพิจารณาค่าการคืนตัว (setback) สามารถวิเคราะห์ได้จากผลต่างของค่าความหนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดสูงสุด โดยค่าการคืนตัวมากหรือมีค่าบวก จะมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดี โดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีแนวโน้มการคืนตัวได้ดี กล่าวคือ แป้งมีการเกิดเจลดี (Gebre-Mariam and Schmidt, 1996) จากผลการทดลองพบว่าระดับการคืนตัวของแป้งที่มีค่ามากที่สุด คือ แป้งถั่วเขียว รองลงมาคือแป้งถั่วหัวช้าง และแป้งกระจับ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิด ($r = 0.70$)

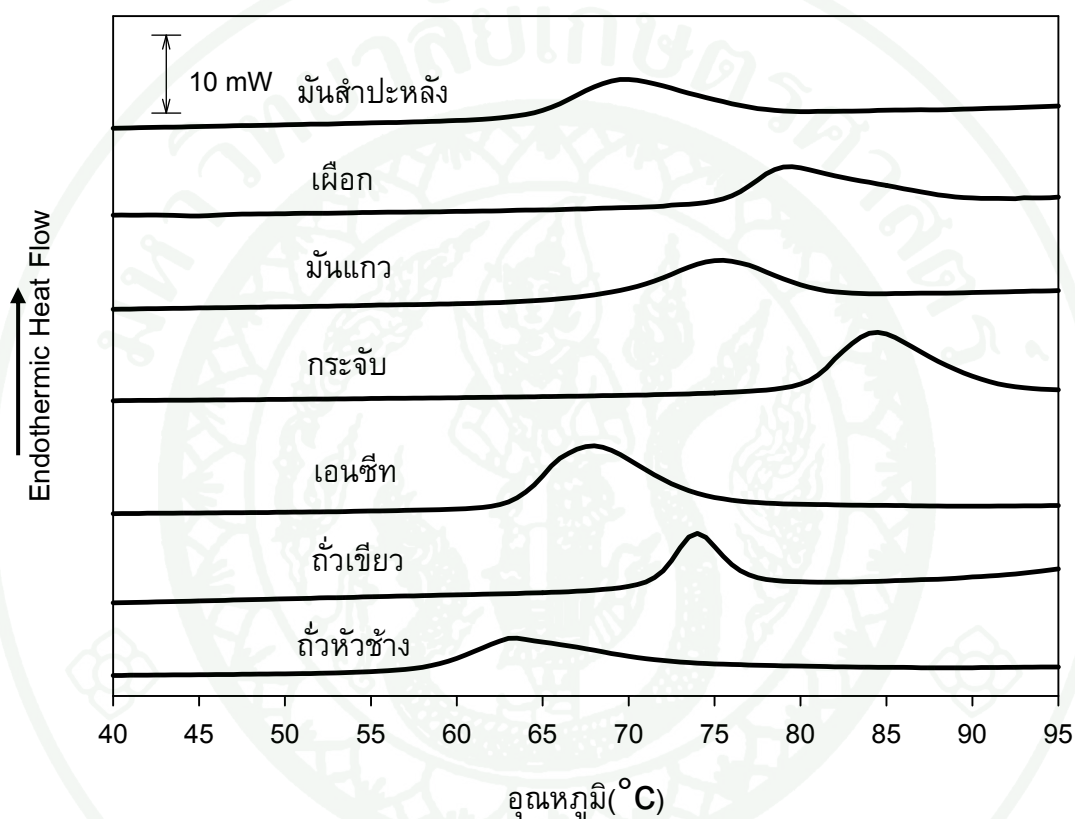
ตารางที่ 8 คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)¹

ชนิดแป้ง	Pasting Temp (°C)	Peak Viscosity (P, RVU)	Viscosity at 95 °C (H, RVU)	Viscosity at 50 °C (C, RVU)	Breakdown (P-H, RVU)	Setback from peak (C-P, RVU)
มันสำปะหลัง	72.28 ± 0.32 ^d	319 ± 0 ^b	143 ± 1 ^d	193 ± 1 ^d	176 ± 1 ^a	-126 ± 2 ^g
เผือก	82.35 ± 0.28 ^b	197 ± 4 ^e	117 ± 0 ^f	177 ± 1 ^e	80 ± 4 ^e	-22 ± 5 ^d
มันแกว	77.08 ± 0.04 ^c	281 ± 3 ^c	133 ± 2 ^e	191 ± 3 ^d	148 ± 2 ^b	-90 ± 0 ^f
กระจับ	86.80 ± 0.49 ^a	222 ± 3 ^d	168 ± 2 ^b	259 ± 2 ^c	54 ± 2 ^f	37 ± 0 ^c
เอนซีท	69.80 ± 0.35 ^f	277 ± 2 ^c	138 ± 2 ^d	193 ± 1 ^d	139 ± 1 ^c	-84 ± 3 ^e
ถั่วเขียว	77.63 ± 0.25 ^c	373 ± 7 ^a	272 ± 2 ^a	535 ± 3 ^a	101 ± 5 ^d	162 ± 3 ^a
ถั่วหัวช้าง	71.28 ± 0.32 ^e	176 ± 0 ^f	151 ± 1 ^c	290 ± 3 ^b	25 ± 1 ^g	114 ± 3 ^b

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.6 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ในการเกิดเจลที่ในเซชันของแป้งชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังภาพที่ 23 และตารางที่ 9



ภาพที่ 23 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงสมบัติอุณหพลศาสตร์การเกิดเจลที่ในเซชันของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

ผลจากตารางที่ 9 พบว่า แป้งกระจับมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{OG}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{PG}) และอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{CG}) สูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 80.22, 84.39 และ 91.07 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากที่ Jane *et al.* (1999) รายงานโดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{OG}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{PG}) และอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{CG}) เท่ากับ 58.70, 70.10 และ 82.80 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งที่

แตกต่างกันด้วยช่วงเวลาการเจริญเติบโตที่แตกต่าง ซึ่ง Chiang *et al.* (2007) ได้รายงานว่า แป้งกระจับจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{OG}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{PG}) และอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{CG}) เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเพาะปลูกนานขึ้น แป้งเผือกมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{OG}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{PG}) และอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{CG}) มากรองลงมาโดยมีค่าเท่ากับ 73.98, 80.73 และ 84.40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh *et al.* (2007)

เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีไนซ์ที่อยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{OG}) และอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (T_{CG}) พบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีไนซ์ของแป้งถั่วเขียว (5.44 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่าแป้งถั่วหัวช้าง (16.06 องศาเซลเซียส) ในงานวิจัยของ Sandhu and Lim (2008) พบว่าแป้งถั่วหัวช้างมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีไนซ์กว้างกว่าเมื่อเทียบกับแป้งถั่วเขียว บ่งชี้ได้ว่าแป้งถั่วหัวช้างมีการกระจายตัวของโครงสร้างผลึกไม่สม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้ามหากช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีไนซ์แคบ แสดงว่าลักษณะโครงสร้างผลึกมีความสม่ำเสมอมากกว่า

เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีไนเซชัน (ΔH_G) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณโครงสร้างที่เป็นระเบียบของอะมิโลเพกทิน (Tester and Morrison, 1990) จากตารางที่ 9 พบว่าแป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันแกวมีปริมาณพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีไนซ์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ คือ อยู่ใน 15.70 – 15.91 จูลต่อกรัม การที่แป้งทั้งสองใช้พลังงานในการเกิดเจลลิตีไนซ์ไม่แตกต่างกันแสดงว่าปริมาณโครงสร้างที่เป็นระเบียบใกล้เคียงกัน ซึ่งบ่งชี้ได้จากลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่ของอะมิโลเพกทิน พบว่า มีร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่ขนาดสั้น (short A chain: DP 6-12 และ short B1 chain: DP 13-24) ไม่แตกต่างกัน

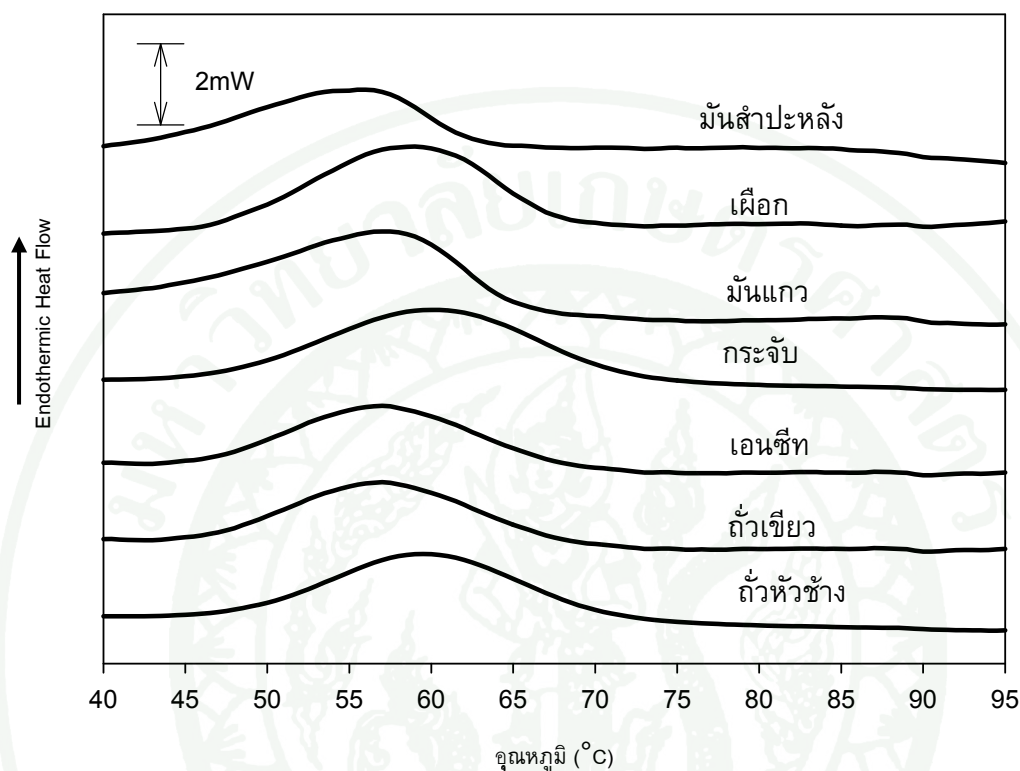
ตารางที่ 9 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งชนิดต่างๆ
เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ^{1,2}

ชนิดแป้ง	อุณหภูมิเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization temperature, °C)				ΔH_G (J/g)
	T_{OG}	T_{PG}	T_{CG}	$T_{CG}-T_{OG}$	
มันสำปะหลัง	64.56 ± 0.28^e	69.97 ± 0.25^e	77.98 ± 0.46^d	13.42 ± 0.34^b	15.91 ± 0.36^c
เผือก	73.98 ± 1.71^b	80.73 ± 1.27^b	84.40 ± 0.20^b	10.43 ± 1.58^{cd}	16.59 ± 0.11^c
มันแกว	69.06 ± 0.29^d	75.17 ± 0.42^c	81.08 ± 0.59^c	12.02 ± 0.36^c	15.70 ± 0.53^c
กระเจ็บ	80.22 ± 0.29^a	84.39 ± 0.42^a	91.07 ± 0.68^a	10.85 ± 0.40^{cd}	19.28 ± 0.34^b
เอนซีท	63.28 ± 0.20^f	67.78 ± 0.25^f	74.31 ± 0.53^f	11.02 ± 0.33^d	20.92 ± 0.88^a
ถั่วเขียว	71.18 ± 0.22^c	73.70 ± 0.27^d	76.62 ± 0.39^e	5.44 ± 0.21^e	11.63 ± 0.64^d
ถั่วหัวช้าง	58.02 ± 0.33^g	63.28 ± 0.35^g	74.09 ± 0.38^f	16.06 ± 0.06^a	16.07 ± 0.57^c

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² T_{OG} (Onset temperature) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน
 T_{PG} (Peak temperature) คือ อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน
 T_{CG} (Conclution temperature) คือ อุณหภูมิจุดสุดท้ายของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน
 ΔH_G (Enthalpy) คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีโนเซชัน

ผลจากการนำแป้งทั้ง 7 ชนิด ที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วัน มาวิเคราะห์สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 24 และตารางที่ 10



ภาพที่ 24 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงสมบัติอุณหพลศาสตร์การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differtial Scanning Calorimeter (DSC)

ผลจากตารางที่ 10 พบว่า พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของแป้งที่รีโทรเกรเดชันต่ำกว่า พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชัน แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกอย่างไม่สมบูรณ์หลังจากเกิดเจลลิตีในเซชันแล้ว (Singh *et al.*, 2003) ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชัน (%R) ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนของเอนทัลปีของแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันต่อเอนทัลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งดิบ พบว่า ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งมันแกวมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีค่าต่ำที่สุด การที่ร้อยละการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลการกระจายตัวของสายโซ่ของอะมิโลเพกทินในโมเลกุลของแป้งที่แตกต่างกัน (Jane *et al.*, 1999) นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก (T_{OR}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก (T_{PR}) และอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการหลอมผลึก (T_{CR}) มีค่าต่ำที่สุด

ตารางที่ 10 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของแป้งรีโทรเกรดชนิดต่างๆ โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)^{1,2}

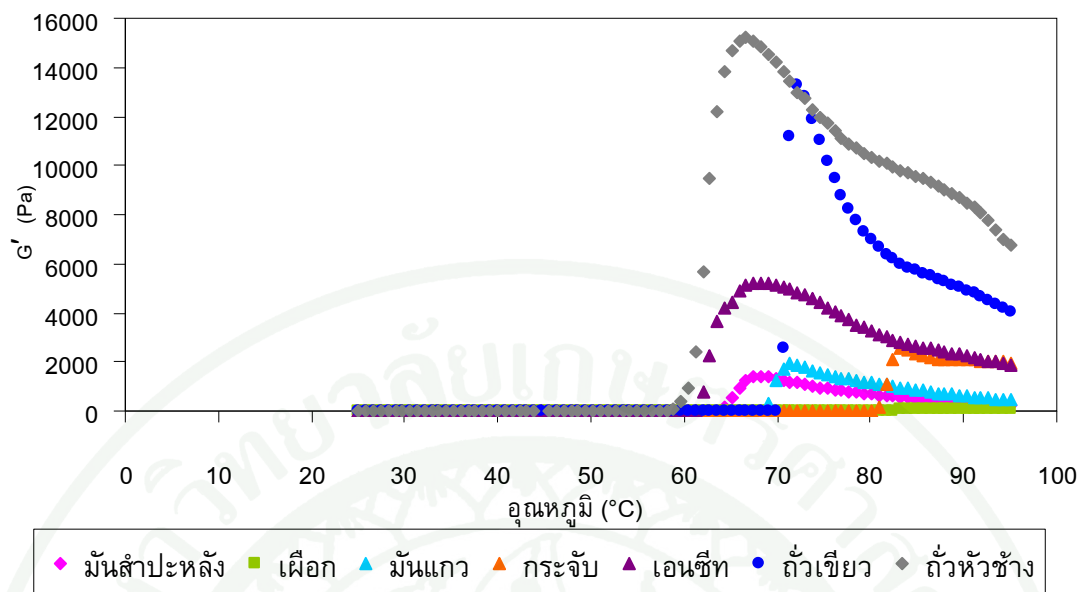
ชนิดแป้ง	อุณหภูมิรีโทรเกรดชัน (retrogradation temperature, °C)			ΔH_R (J/g)	%R
	T _{OR}	T _{PR}	T _{CR}		
มันสำปะหลัง	41.87 ± 0.61 ^e	54.07 ± 0.47 ^e	60.52 ± 0.02 ^f	5.95 ± 0.93 ^d	37.36 ± 5.54 ^d
เผือก	45.55 ± 0.47 ^c	56.86 ± 0.07 ^{bc}	65.44 ± 0.35 ^d	10.55 ± 0.22 ^a	63.58 ± 1.47 ^a
มันแกว	48.73 ± 0.57 ^a	57.53 ± 0.59 ^{bc}	63.89 ± 0.48 ^e	10.37 ± 0.59 ^a	66.00 ± 1.84 ^a
กระฉับ	45.32 ± 0.20 ^c	58.28 ± 0.09 ^a	70.17 ± 0.16 ^a	10.25 ± 0.43 ^a	53.16 ± 2.85 ^b
เอนชืท	44.21 ± 0.47 ^d	56.50 ± 0.44 ^c	67.89 ± 0.75 ^c	9.51 ± 0.09 ^{ab}	45.53 ± 1.88 ^c
ถั่วเขียว	44.92 ± 0.19 ^c	55.03 ± 0.15 ^d	65.29 ± 0.09 ^d	7.22 ± 0.32 ^c	62.22 ± 4.02 ^a
ถั่วหัวช้าง	46.23 ± 0.25 ^b	57.33 ± 0.34 ^b	68.78 ± 0.36 ^b	8.42 ± 0.06 ^{bc}	52.44 ± 2.18 ^b

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

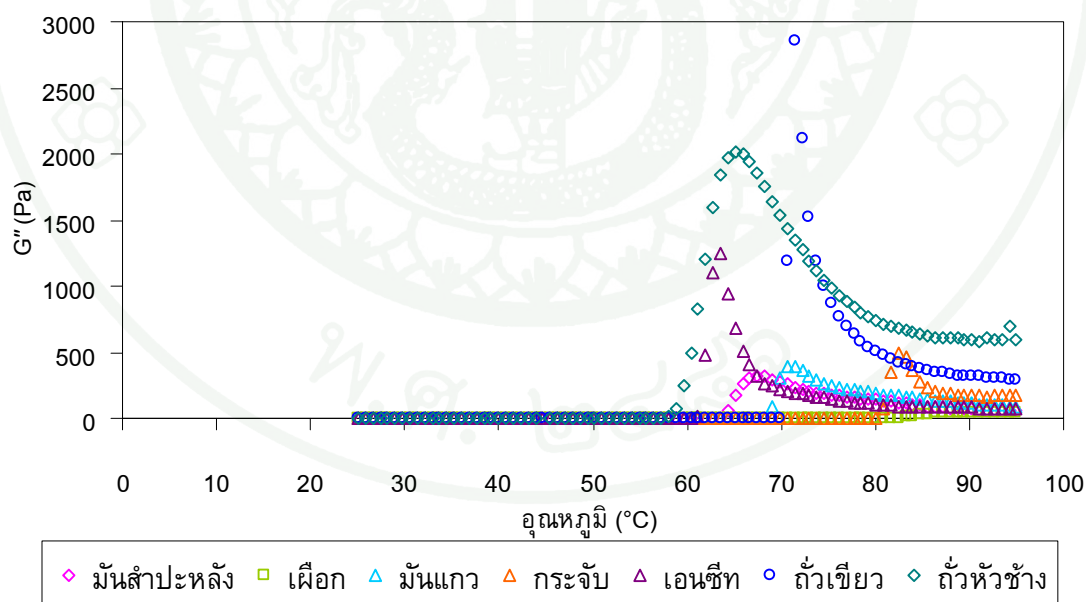
² T_{OR} (Onset temperature) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก
 T_{PR} (Peak temperature) คือ อุณหภูมิที่จุดสูงสุดของการหลอมผลึก
 T_{CR} (Conclution temperature) คือ อุณหภูมิจุดสุดท้ายของการหลอมผลึก
 ΔH_R (Enthalpy) คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก
 %R (% retrogradation) คือ ร้อยละของการเกิดรีโทรเกรดชัน

1.7 สมบัติวัฏภาคการไหล

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง จะทำให้เม็ดแป้งบวม ทำให้ค่าพลังงานที่เก็บไว้ในโมเลกุล (storage modulus : G') เพิ่มขึ้น เมื่อให้ความร้อนต่อไปเม็ดแป้งจะแตกส่งผลให้ G' ลดลง (Hsu *et al.*, 2000) ดังแสดงในภาพที่ 25 และตารางที่ 11



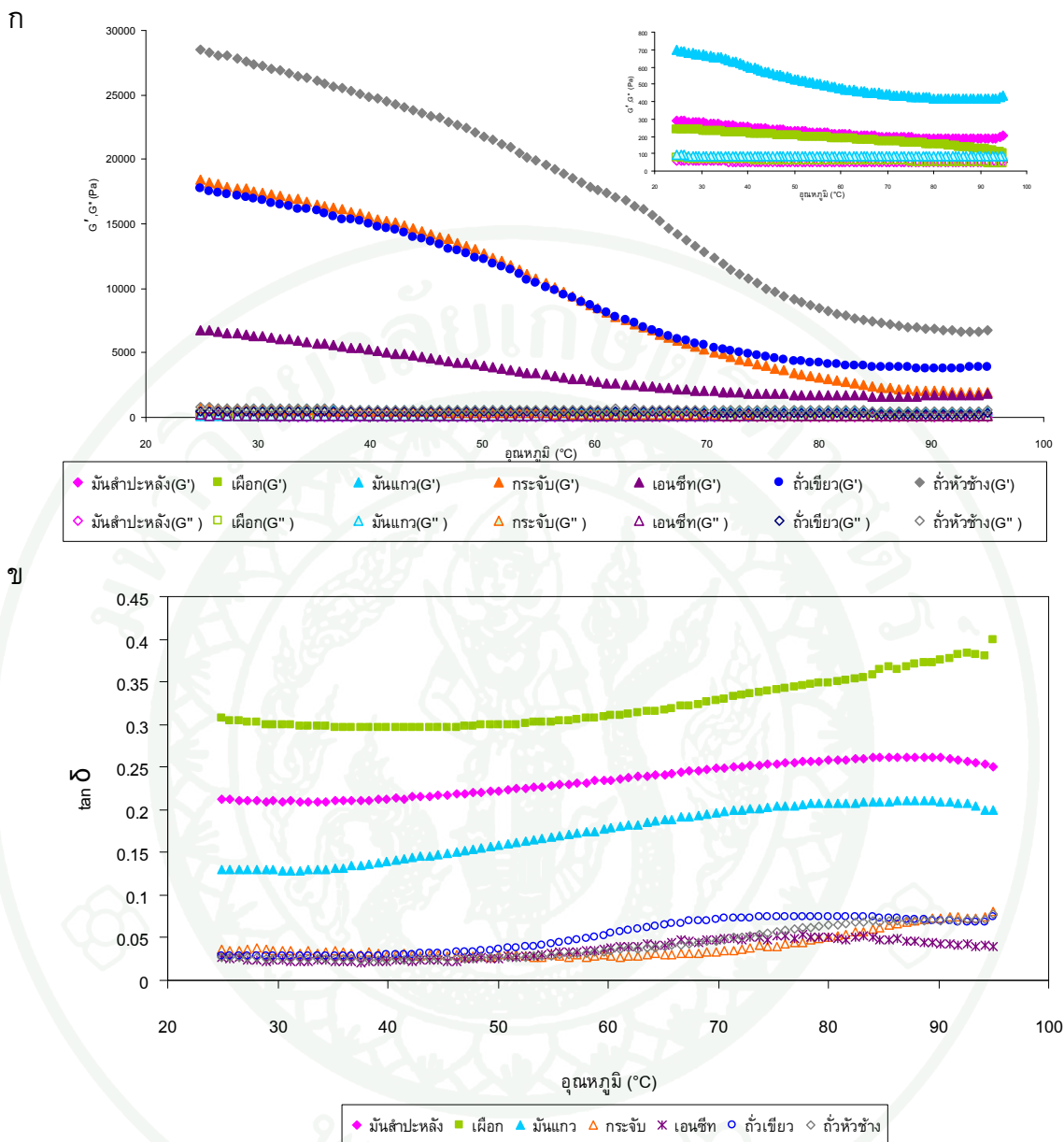
ภาพที่ 25 ผลการศึกษาสมบัติวัฏภาคการไหล (temperature sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') ของแป้งความเข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) ขณะให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 26 ผลการศึกษาสมบัติวัฏภาคการไหล (temperature sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า loss modulus (G'') ของแป้งความเข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) ขณะให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิขณะที่ G' มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (T_G) มีค่าแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของแป้ง (57.68-74.98 องศาเซลเซียส) โดยอุณหภูมิดังกล่าวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย RVA โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ($r = 0.95$) และอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลที่ในเซชัน (T_{OG}) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ($r = 0.99$) ขณะที่ให้ความร้อนแป้งถั่วหัวช้างแสดงค่า G' ที่มีค่าสูงสุด (Peak G') มากที่สุด (13,083 Pa) ขณะเดียวกันแป้งเผือกมีค่าต่ำที่สุด (116 Pa) (ภาพที่ 25 ตารางที่ 11) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณอะมิโลสที่พบในแป้ง ($r = 0.97$) Sodhi and Singh (2003) ได้รายงานว่าแป้งข้าวที่มีอะมิโลสสูงจะมีค่า Peak G' สูง ขณะที่ค่า G'' (loss modulus) จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับค่า G' (ภาพที่ 26)

เมื่อทำให้เย็นจากอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 27) พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของ G' อีกครั้ง โดยแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ได้แก่ แป้งถั่วหัวช้าง แป้งถั่วเขียว และแป้งกระจับ แสดงลักษณะกราฟตอนปลายสูงชันมาก โดยมีค่า G' ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 24,489, 17,195 และ 18,615 Pa ตามลำดับ (ตารางที่ 11) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากแป้งเปียกเป็นเจล ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณอะมิโลส (Singh *et al.*, 2007) ในขณะที่แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว มีค่า G' ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ต่ำกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 410, 241 และ 727 Pa ตามลำดับ (ตารางที่ 11) บ่งชี้ได้ว่า ค่า G' ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์กับปริมาณอะมิโลสในแป้ง ($r = 0.85$) นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งอาจประมาณได้จาก $\tan \delta$ ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของ G'' ต่อ G' โดยแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีจะมีค่า $\tan \delta$ ต่ำ (Hsu *et al.*, 2000) ค่า $\tan \delta$ ของแป้งแต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 11 พบว่า สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ แป้งที่มีค่า $\tan \delta$ ต่ำ (แป้งกระจับ แป้งเอนชี่ท แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง) และแป้งที่มีค่า $\tan \delta$ สูง (แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว) โดยการแบ่งกลุ่มดังกล่าวสอดคล้องกับค่า G' ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่รายงานไว้ กล่าวคือแป้งในกลุ่มแรกเกิดเจลได้ดีกว่าแป้งในกลุ่มหลัง



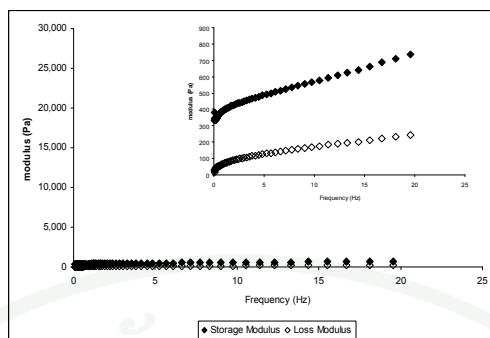
ภาพที่ 27 ผลการศึกษาสมบัติวิภาคการไหล (temperature sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลง

ค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้ง 7 ชนิด (ก),

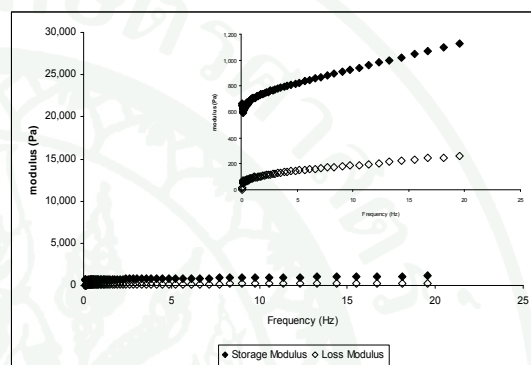
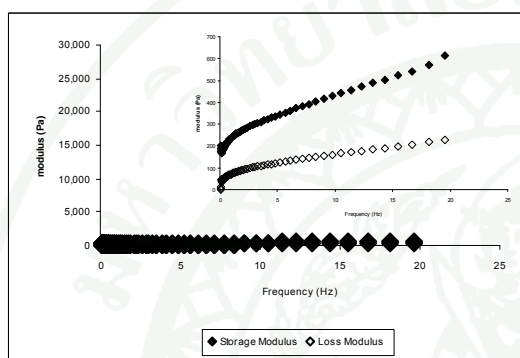
แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว (ภาพเล็ก ก), $\tan \delta$ (ข) ของแป้งความ

เข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) ขณะทำให้เย็นที่ช่วงอุณหภูมิ 95 ถึง 25 องศาเซลเซียส

จากการทดลอง Frequency sweep ของเจลแบ่งโดยให้ความเครียดกับเจลที่ความถี่แตกต่างกัน เพื่อประเมินพฤติกรรมที่ตอบสนองของเจลแบ่ง เมื่อได้รับแรงในอัตราที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะบ่งชี้โครงสร้างและความแข็งแรงของเจลแบ่งได้ (Rao,1990) จากการทดลองค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแบ่งทั้ง 7 ชนิด แสดงดังภาพที่ 28 พบว่าแบ่งทั้ง 7 ชนิด มีค่า G' มากกว่า G'' ทุกความถี่ของการทดลอง โดยแบ่งมันสำปะหลัง แบ่งเผือก และแบ่งมันแกว มีค่าการเปลี่ยนแปลง G' เพิ่มขึ้น เมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเจลอ่อน (weak gel) (McGrane *et al.*, 2004) โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง G' เท่ากับ 139, 206 และ 76 ตามลำดับ (ตารางที่11) ในขณะที่แบ่งกระจับ แบ่งเอนซีท แบ่งถั่วเขียว และแบ่งถั่วหัวช้าง มีค่า G' เปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเจลที่แท้จริง (strong หรือ true gel) (McGrane *et al.*, 2004) โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง G' เท่ากับ 24, 21, 16 และ 9 ตามลำดับ แสดงว่าโครงสร้างภายในของเจลมีความยืดหยุ่น เนื่องจากมีโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง จึงไม่ถูกทำลายเมื่อมีแรงหรือความถี่มากกระทำ (Lii *et al.*,1995)

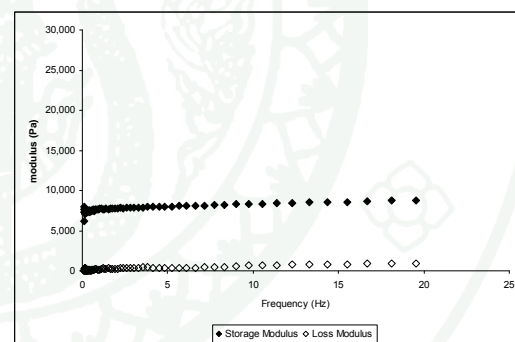
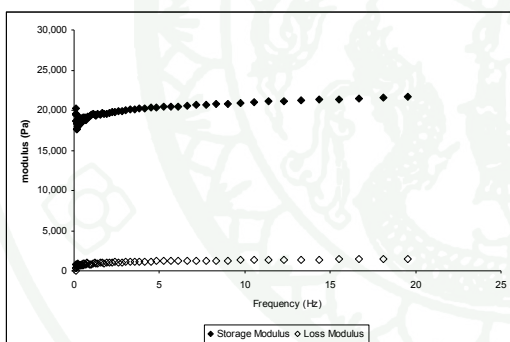


แป้งมันสำปะหลัง



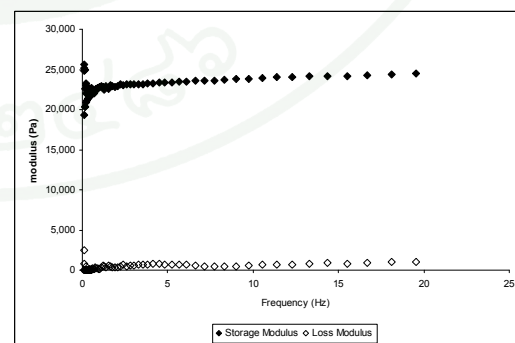
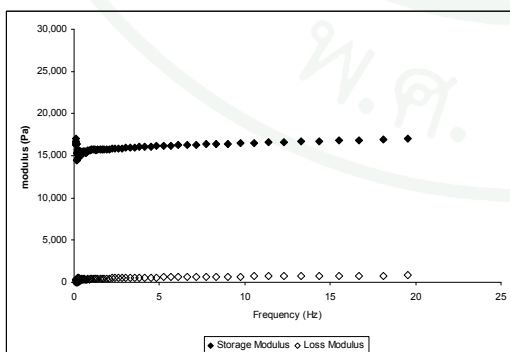
แป้งเผือก

แป้งมันแกว



แป้งกระเจี๊ยบ

แป้งเอนซีท



แป้งถั่วเขียว

แป้งถั่วหัวช้าง

ภาพที่ 28 ผลการศึกษาสมบัติทางกลการไหล (frequency sweep) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้ง 7 ชนิด

ตารางที่ 11 สมบัติวิทยาการไหลของแป้งชนิดต่างๆ¹

ชนิดแป้ง	Temperature sweep ²				Frequency sweep ³				
	T _G ' (°C)	Peak G' (Pa)	ที่ 95 องศาเซลเซียส		ที่ 25 องศาเซลเซียส		G' _{LF} (Pa)	G' _{HF} (Pa)	ΔG' (%)
			ในขณะที่ให้ความร้อน		ในขณะที่ทำให้เย็น				
			G' (Pa)	tan δ	G' (Pa)	tan δ			
มันสำปะหลัง	61.62 ± 0.56 ^d	2329 ± 26 ^d	259 ± 40 ^f	0.24 ± 0.01 ^b	410 ± 45 ^e	0.23 ± 0.01 ^b	384±1 ^{ef}	737±1 ^{ef}	92±0 ^b
เผือก	67.51 ± 0.00 ^{bc}	107 ± 6 ^e	104 ± 1 ^f	0.41 ± 0.00 ^a	241 ± 0 ^e	0.31 ± 0.01 ^a	197±6 ^f	605±14 ^f	207±2 ^a
มันแกว	65.18 ± 1.15 ^c	1971 ± 8 ^d	504 ± 76 ^e	0.20 ± 0.00 ^c	727 ± 47 ^e	0.14 ± 0.01 ^c	676±31 ^e	1165±49 ^e	72±1 ^c
กระฉับ	74.98 ± 0.56 ^a	2513 ± 18 ^d	2001 ± 49 ^c	0.09 ± 0.01 ^d	18615 ± 346 ^b	0.04 ± 0.00 ^d	18800±283 ^b	22000±424 ^b	17±1 ^f
เอนซีท	60.43 ± 0.00 ^d	5091 ± 158 ^c	1745 ± 72 ^d	0.04 ± 0.00 ^e	6537 ± 378 ^d	0.03 ± 0.01 ^e	6195±21 ^d	8840±85 ^d	43±1 ^d
ถั่วเขียว	68.30 ± 2.23 ^b	10143 ± 159 ^b	3702 ± 513 ^b	0.08 ± 0.01 ^d	17195 ± 648 ^c	0.03 ± 0.00 ^{de}	16758±317 ^c	16774±317 ^c	0±0 ^g
ถั่วหัวช้าง	57.68 ± 0.56 ^e	13083 ± 833 ^a	6112 ± 362 ^a	0.08 ± 0.02 ^d	24489 ± 733 ^a	0.01 ± 0.00 ^f	19250±71 ^a	24400±141 ^a	27±0 ^e

หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

² T_{G'} คือ อุณหภูมิขณะที่ค่า G' เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

Peak G' คือ ค่า G' ที่มีค่าสูงสุดขณะที่ให้ความร้อน

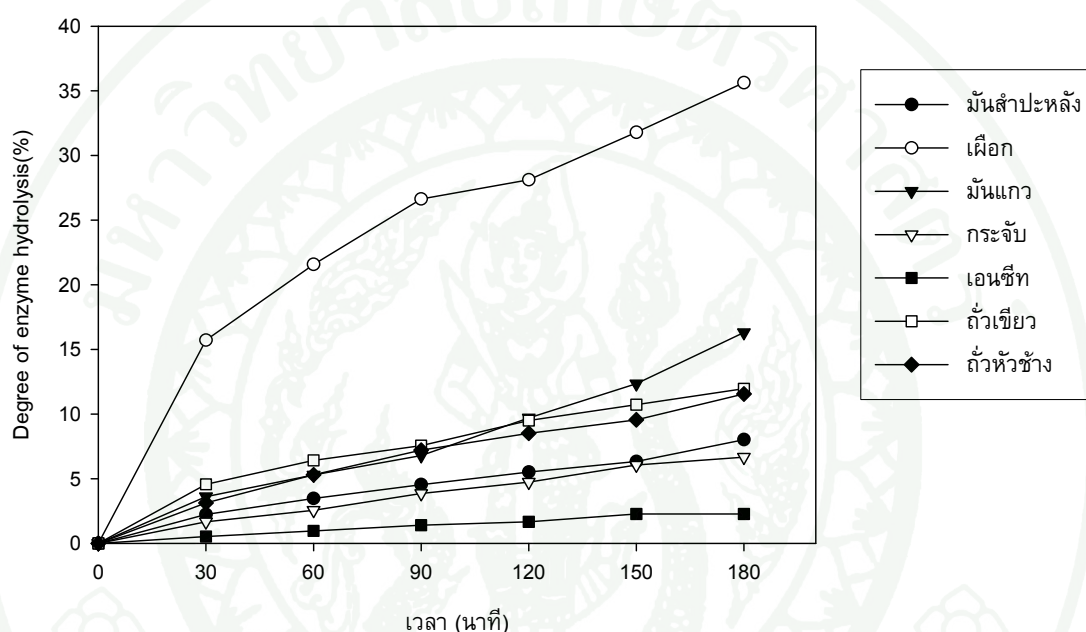
³ ΔG' (%) คือ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่า G' ในการวิเคราะห์ frequency sweep

$$= \frac{(G'_{HF} - G'_{LF})}{G'_{LF}} \times 100$$

โดย G'_{LF} คือค่า G' ที่ความถี่ต่ำ (Low Frequency, 0.1 Hz) และ G'_{HF} คือค่า G' ที่ความถี่สูง (High Frequency, 20 Hz)

1.8 การวิเคราะห์ค่า degree of enzyme hydrolysis

การวิเคราะห์ค่า degree of enzyme hydrolysis ของแป้งชนิดต่างๆ ที่เวลาต่างกัน ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 29 แป้งที่ผ่านการย่อยเป็นเวลา 180 นาที พบว่า แป้งเผือกสามารถถูกย่อยได้มากที่สุด ขณะที่แป้งเอนซีทถูกย่อยได้น้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 35.6 และ 2.3 ตามลำดับ



ภาพที่ 29 ความสามารถในการถูกย่อยของแป้งชนิดต่างๆ

เนื่องจากแป้งเผือกมีขนาดเม็ดแป้งเล็กกว่าแป้งเอนซีทมาก แสดงให้เห็นว่า ขนาดเม็ดแป้งมีผลต่อความสามารถในการถูกย่อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Franco and Ciacco (1992) รายงานว่า ความสามารถในการถูกย่อยลดลงเมื่อแป้งมีขนาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการถูกย่อยของแป้งดิบยังขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างผลึก โดยโครงสร้างผลึกแบบ A จะถูกย่อยได้ง่ายกว่าโครงสร้างผลึกแบบ B (Jane *et al.*, 1997) ในการทดลองพบว่า แป้งเอนซีทซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B มีความสามารถในการถูกย่อยได้ยากกว่า อย่างไรก็ตามความสามารถในการถูกย่อยของแป้งดิบยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผล ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของเม็ดแป้งซึ่งพบว่าแป้งในกลุ่มธัญพืช เช่น ข้าวโพดและข้าวฟ่าง จะมีรูบนผิวและช่องให้เอนไซม์อะมิเลสสามารถย่อยได้ดีกว่าแป้งในกลุ่มพืชหัว เช่น มันฝรั่ง (Fannon *et al.*, 1992) นอกจากนี้ลักษณะของโครงสร้างระดับโมเลกุลของแป้งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อความสามารถใน

การย่อยของเอนไซม์ เช่น อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน การกระจายตัวของสายโซ่ของอะมิโลเพกทินที่มีสายโซ่ขนาดยาวเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการย่อยลดลง (Lehmann and Robin, 2007) จากภาพที่ 29 แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการถูกย่อยของแป้งชนิดต่างๆ ที่เวลา 180 นาทีเรียงลำดับ ดังนี้ แป้งเผือก แป้งมันแกว แป้งถั่วเขียว แป้งถั่วหัวช้าง แป้งมันสำปะหลัง แป้งกระจับ และแป้งเอนซีท คิดเป็นร้อยละ 35.6, 16.1, 12.0, 11.6, 8.0, 6.7 และ 2.3 ตามลำดับ

1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแป้งชนิดต่างๆ และคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

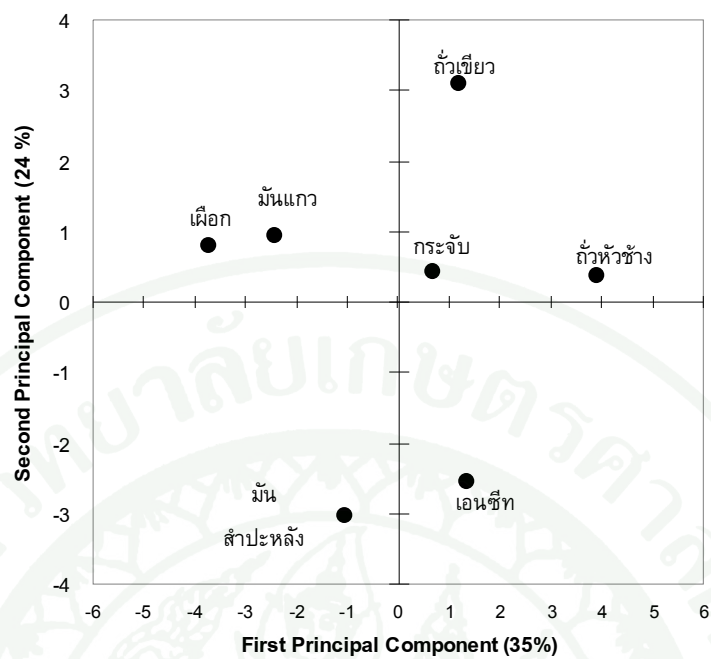
จากการศึกษาสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งทั้ง 7 ชนิด (ตารางที่ 12) พบความสัมพันธ์ของแป้งแต่ละชนิดมีผลต่อคุณสมบัติของแป้งต่างๆ กัน

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของแป้งที่นำมาวิเคราะห์ด้วย Principal Component Analysis (PCA)

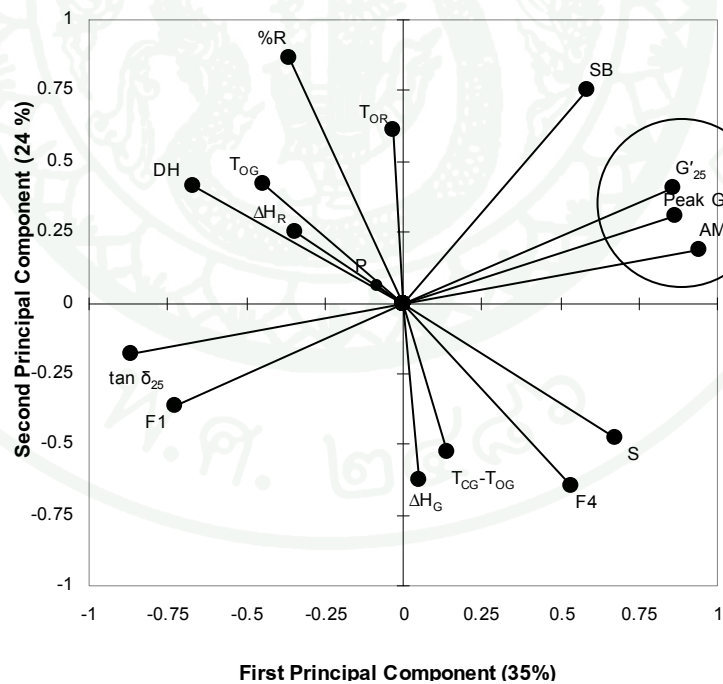
อักษรย่อ	ความหมาย
S	ขนาดเม็ดแป้ง (μm)
AM	ร้อยละปริมาณอะมิโลส
F1	ร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทินขนาดสั้น (DP 6-12)
F4	ร้อยละการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทินขนาดยาว (DP>37)
P	ความหนืดสูงสุด (RVU)
SB	ค่าการคืนตัว (RVU)
T _{OG}	อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลิกไนเซชัน ($^{\circ}\text{C}$)
ΔH_G	ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิกไนเซชัน (J/g)
T _{OR}	อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมผลึก ($^{\circ}\text{C}$)
T _{CG} -T _{OG}	ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิกไนซ์ ($^{\circ}\text{C}$)
ΔH_R	ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมผลึก (J/g)
%R	ร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชัน
Peak G'	ค่า storage modulus (G') ที่มีค่าสูงสุดขณะให้ความร้อน (Pa)
G'_{25}	ค่า storage modulus (G') ที่ 25°C ในขณะที่ทำให้ความเย็น (Pa)
$\tan \delta_{25}$	ค่า $\tan \delta$ ที่ 25°C ในขณะที่ทำให้ความเย็น
DH	ร้อยละความสามารถในการถูกย่อยที่ 180 นาที

เมื่อนำเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร ได้แก่ Principal Component Analysis (PCA) มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เหล่านั้น พบว่า สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 59 โดยใช้ Principal Component Analysis 1 และ 2 (PC1 และ PC2) ดังภาพที่ 30 พบว่า PC1 (แกนนอน) สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 35 และ PC2 (แกนตั้ง) สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 24 นำมาใช้ในการแบ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรก ได้แก่ แป้งเผือก แป้งมันแกว และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพืชหัว กลุ่มที่ 2 ได้แก่ แป้งถั่วเขียว แป้งถั่วหัวช้าง และแป้งเอนซีท ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มตระกูลถั่ว และกล้วย จากภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และความสามารถในการย่อยของแป้ง พบว่า PC1 มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติ AM, Peak G', และ G' ₂₅ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจล เมื่อนำมาแยกความแตกต่างของแป้ง 7 ชนิดสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ 1) กลุ่มที่มีปริมาณอะมิโลส, ค่า G' ที่มีค่าสูงสุดขณะให้ความร้อน และ G' ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในขณะที่ทำให้ความเย็นมีค่าต่ำ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันแกว และแป้งเผือก และ 2) กลุ่มที่มีลักษณะดังกล่าวสูง ได้แก่ แป้งถั่วหัวช้าง, แป้งถั่วเขียว, แป้งเอนซีท และแป้งกระจับ เมื่อพิจารณาสมบัติทางรีโอโลยี (ตารางที่ 13) พบว่า แป้งกลุ่มที่หนึ่งแสดงลักษณะของของเหลวซึ่งแสดงพฤติกรรมการยืดหยุ่น (viscous) หรือแป้งเปื่อย ในขณะที่แป้งกลุ่มที่สองแสดงลักษณะของของแข็งซึ่งแสดงพฤติกรรมการยืดหยุ่น (elastic) หรือเจล

แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสต่ำทำให้เกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลส ในระหว่างการเย็นตัวต่ำ แป้งมันสำปะหลังจึงเป็นแป้งที่มีการคืนตัวต่ำ ส่งผลให้เจลที่ได้มีลักษณะนิ่มใส ไม่ทึบแสง เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติการเกิดเจลจากแป้งมันสำปะหลัง จากการศึกษาแป้งทั้ง 7 ชนิด พบว่า แป้งในกลุ่มที่สอง ได้แก่ แป้งถั่วหัวช้าง, แป้งถั่วเขียว, แป้งเอนซีท และแป้งกระจับ ซึ่งมีสมบัติที่บ่งถึงคุณลักษณะการเกิดเจลของแป้งได้ดี สามารถนำมาใช้ผสมกับแป้งมันสำปะหลังเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเจล



ภาพที่ 30 การจัดกลุ่มของตัวอย่างแป้ง 7 ชนิด



ภาพที่ 31 การจัดกลุ่มของคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง

ตารางที่ 13 คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ^{1,2}

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (ร้อยละ)	Setback from peak (C-P, RVU)	G' (Pa) ที่ 25 องศาเซลเซียส	tan δ
กลุ่มที่ 1				
มันสำปะหลัง	17.44 ± 0.55 ^d	-126 ± 2 ^g	410 ± 45 ^e	0.23 ± 0.01 ^b
เผือก	7.91 ± 0.17 ^f	-22 ± 5 ^d	241 ± 0 ^e	0.31 ± 0.01 ^a
มันแกว	14.15 ± 0.90 ^e	-90 ± 0 ^f	727 ± 47 ^e	0.14 ± 0.01 ^c
กลุ่มที่ 2				
กระฉับ	19.20 ± 0.17 ^{cd}	37 ± 0 ^c	18615 ± 346 ^b	0.04 ± 0.00 ^d
เอนซีท	20.85 ± 1.70 ^c	-84 ± 3 ^e	6537 ± 378 ^d	0.03 ± 0.01 ^e
ถั่วเขียว	28.47 ± 0.80 ^b	162 ± 3 ^a	17195 ± 648 ^c	0.03 ± 0.00 ^{de}
ถั่วหัวช้าง	35.59 ± 0.28 ^a	114 ± 3 ^b	24489 ± 733 ^a	0.01 ± 0.00 ^f

หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

² setback from peak จากการวิเคราะห์ด้วย RVA

G' ที่ 25 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์สมบัติวิภาคการไหล

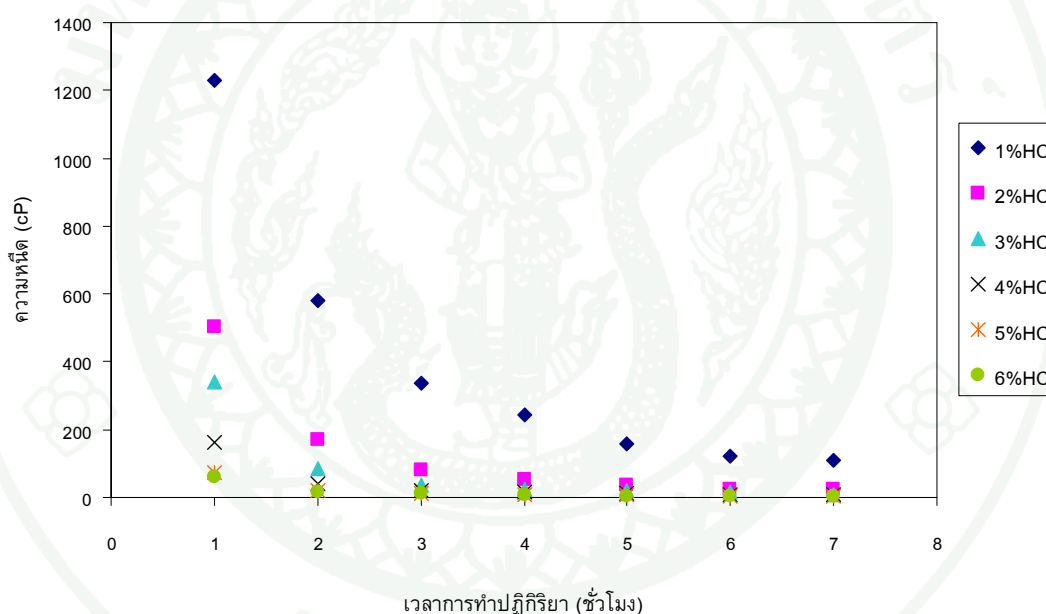
tan δ ที่ 25 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์สมบัติวิภาคการไหล

2. การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด

2.1 ความหนืด

2.1.1 ความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วย Brookfield Viscometer

เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังมาผ่านการดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ต่อน้ำหนักแป้ง และที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1-7 ชั่วโมง ได้แป้งย่อยด้วยกรดซึ่งมีความหนืดขณะร้อนของแป้งดัดแปร แสดงดังภาพที่ 32 และตารางที่ 14



ภาพที่ 32 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ในการดัดแปรแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริก จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยกรดไฮโดรคลอริกจะไปทำลายพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลแป้ง ทำให้แป้งมีขนาดโมเลกุลสั้นลง ส่งผลให้ความหนืดของแป้งย่อยด้วยกรดลดลง (Wurzburg, 1986) จากการตรวจวัดความหนืดที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของตัวอย่างแป้งย่อยด้วยกรดในการทดลองครั้งนี้ พบว่าได้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ แป้งย่อยด้วยกรดทุกตัวอย่างมีความหนืดลดลงเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบที่มีความเข้มข้นเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลความเข้มข้นของสารละลายกรด

ต่อสมบัติด้านความหนืดที่เวลาการทำปฏิกิริยาเดียวกัน พบว่า แป้งดัดแปรจะมีความหนืดลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายกรด (ดังแสดงในภาพที่ 32 และตารางที่ 14) การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดัดแปรมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลของแป้งดัดแปร การดัดแปรที่ได้ความหนืดต่ำจะมีปฏิกิริยาของการลดขนาดโมเลกุลของแป้งเกิดได้มาก และในทางกลับกันในกรณีของแป้งดัดแปรที่ยังคงมีความหนืดค่อนข้างสูง ความสามารถในการลดขนาดโมเลกุลของแป้งเกิดได้น้อยกว่า สำหรับผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติด้านความหนืด พบว่า แป้งดัดแปรมีความหนืดลดลงตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น จากภาพที่ 32 จะเห็นว่าผลของเวลาการทำปฏิกิริยาที่ระดับความเข้มข้นกรดระดับต่าง ๆ จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่การเปลี่ยนแปลงจะเกิดได้เร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นกรดสูง หลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งจะลดลงเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น

ตารางที่ 14 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส^{1,2}

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ความหนืดขณะร้อนด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer (cP)						
	เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ชั่วโมง)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1229.0 ± 9.9 ^{a,A}	579.0 ± 8.5 ^{b,A}	338.0 ± 4.2 ^{c,A}	241.7 ± 11.7 ^{d,A}	158.3 ± 5.2 ^{e,A}	120.5 ± 2.8 ^{f,A}	108.0 ± 2.4 ^{f,A}
2	504.2 ± 8.2 ^{a,B}	170.0 ± 7.1 ^{b,B}	81.0 ± 2.8 ^{c,B}	54.0 ± 1.4 ^{d,B}	35.0 ± 2.8 ^{e,B}	25.5 ± 0.7 ^{ef,B}	23.0 ± 0.4 ^{f,B}
3	341.7 ± 2.4 ^{a,C}	85.0 ± 2.8 ^{b,C}	38.0 ± 1.1 ^{c,C}	23.5 ± 0.3 ^{d,C}	20.5 ± 0.7 ^{e,C}	15.5 ± 0.7 ^{f,C}	10.0 ± 0.0 ^{g,C}
4	162.0 ± 2.5 ^{a,D}	42.5 ± 2.5 ^{b,D}	20.0 ± 0.0 ^{c,D}	17.0 ± 0.3 ^{c,CD}	12.0 ± 0.0 ^{d,D}	10.0 ± 0.0 ^{de,D}	7.5 ± 0.0 ^{e,D}
5	72.5 ± 2.1 ^{a,E}	21.5 ± 0.7 ^{b,E}	14.0 ± 1.0 ^{c,E}	8.5 ± 0.7 ^{d,D}	6.5 ± 0.1 ^{de,DE}	5.5 ± 0.0 ^{e,E}	5.0 ± 0.0 ^{a,E}
6	59.3 ± 1.1 ^{a,E}	16.5 ± 0.7 ^{b,E}	11.0 ± 0.0 ^{c,E}	7.0 ± 0.7 ^{d,D}	5.0 ± 0.0 ^{f,E}	4.5 ± 0.0 ^{f,E}	4.0 ± 0.0 ^{f,E}
ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity : WF)						
	เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ชั่วโมง)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	n.d	n.d	9 ± 0 ^{e,E}	12 ± 1 ^{d,E}	16 ± 0 ^{c,F}	23 ± 0 ^{b,E}	34 ± 0 ^{a,E}
2	n.d	22 ± 1 ^{f,E}	38 ± 0 ^{e,D}	46 ± 2 ^{d,D}	52 ± 0 ^{c,E}	57 ± 1 ^{b,D}	60 ± 0 ^{a,D}
3	8 ± 0 ^{e,D}	40 ± 1 ^{d,D}	48 ± 1 ^{c,C}	58 ± 0 ^{b,C}	59 ± 1 ^{b,D}	67 ± 1 ^{a,C}	69 ± 0 ^{a,C}
4	22 ± 1 ^{f,C}	50 ± 1 ^{e,C}	61 ± 1 ^{d,B}	65 ± 1 ^{c,B}	70 ± 1 ^{b,C}	76 ± 1 ^{a,B}	75 ± 1 ^{a,B}
5	39 ± 0 ^{f,B}	59 ± 2 ^{e,B}	68 ± 1 ^{d,A}	73 ± 1 ^{c,A}	75 ± 1 ^{bc,B}	78 ± 2 ^{ab,AB}	81 ± 1 ^{a,A}
6	43 ± 1 ^{f,A}	65 ± 0 ^{e,A}	69 ± 2 ^{d,A}	75 ± 1 ^{c,A}	79 ± 1 ^{b,A}	80 ± 1 ^{ab,A}	82 ± 1 ^{a,A}

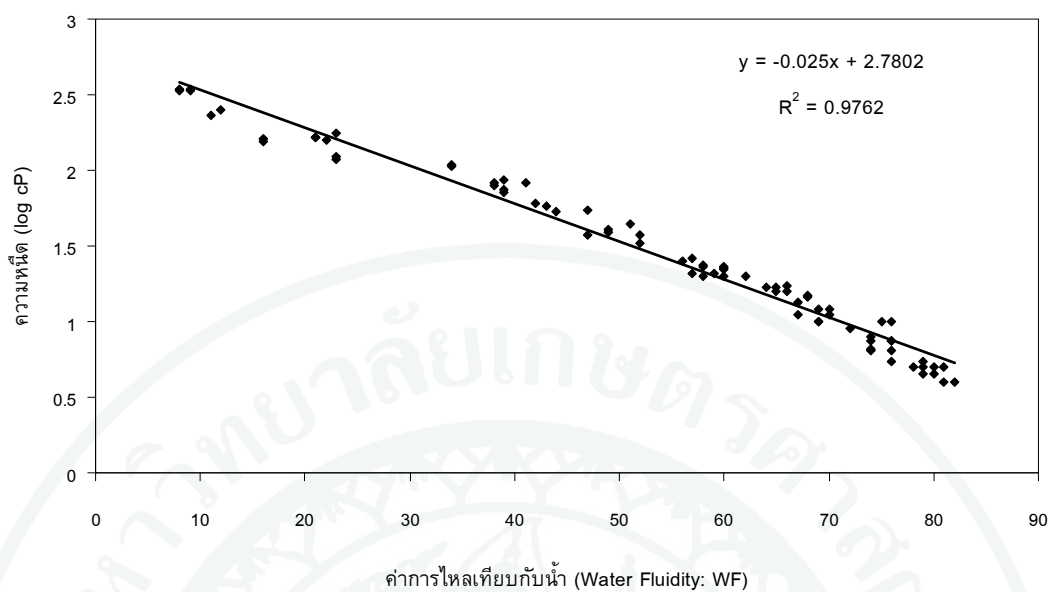
หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² n.d = not determined (ตัวอย่างมีความหนืดสูงจึงไม่สามารถตรวจวัดค่าได้)

2.1.2 ค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity : WF)

เมื่อทำการตรวจวัดค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity: WF) ในตัวอย่าง แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 1 เวลาทำปฏิกิริยา 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่า แป้งเปียกมีความเหนียวมากจึงไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าการไหลเทียบกับน้ำได้ ซึ่งพบผลเช่นเดียวกับการตัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 2 ที่เวลาทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง (ตารางที่ 14) แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดน้อย ทำให้อัตราส่วนการเข้าทำปฏิกิริยาของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกต่อแป้งทั้งหมดลดลง ทำให้การตัดพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลแป้งเกิดได้ค่อนข้างน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการไหลเทียบกับน้ำของแป้งย่อยด้วยกรดที่มีความเข้มข้นของสารละลายกรดเพิ่มขึ้น พบว่า แป้งตัดแปร มีค่าการไหลเทียบกับน้ำเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากัน จะมีค่าการไหลเทียบกับน้ำของแป้งตัดแปรที่ได้จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน คือมีความเป็นของเหลวที่ไหลได้ดีมากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งในตารางที่ 14 จะเห็นว่า ความหนืดมีความสัมพันธ์กับค่าการไหลเทียบกับน้ำแบบผกผัน กล่าวคือ ค่าความหนืดน้อย จะให้ค่าการไหลเทียบกับน้ำมาก แต่ในขณะที่ค่าความหนืดมากจะให้ค่าการไหลเทียบกับน้ำน้อย (ดังแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 33) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Wurzburg (1986) ค่าความหนืดของตัวอย่างแป้งตัดแปรสามารถแปลงค่าเป็นค่าการไหลเทียบกับน้ำจากสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นในบางครั้งการใช้งานแป้งกับความหนืดจะมีการใช้ค่าการไหลเทียบกับน้ำในการกำหนดคุณลักษณะความหนืดของแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรดได้

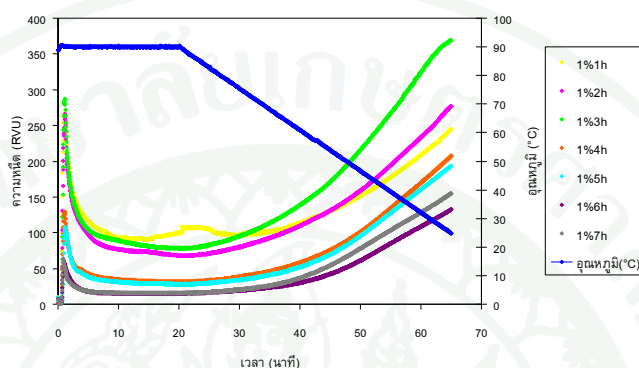


ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับค่าการไหลเทียบกับน้ำของแป้งมันสำปะหลัง
 ดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำ
 ปฏิกริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

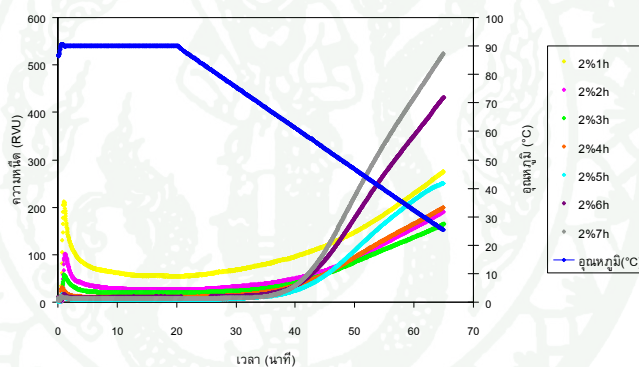
2.1.3 ลักษณะความหนืดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

เมื่อนำแป้งดัดแปรด้วยกรดมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเป็นตัวด้วยเครื่อง RVA ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 34

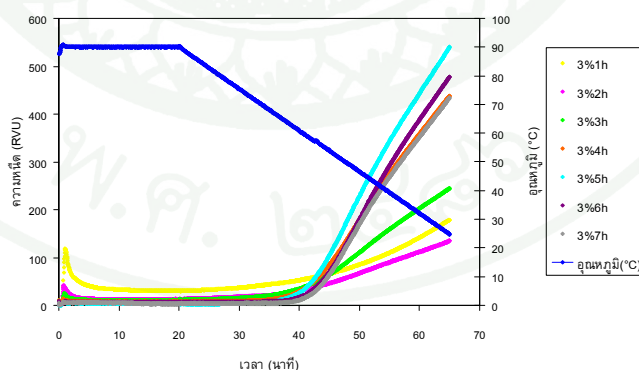
(ก) 1%HCl



(ข) 2%HCl

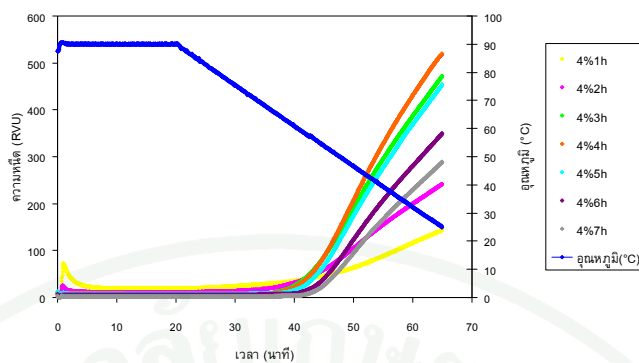


(ค) 3%HCl

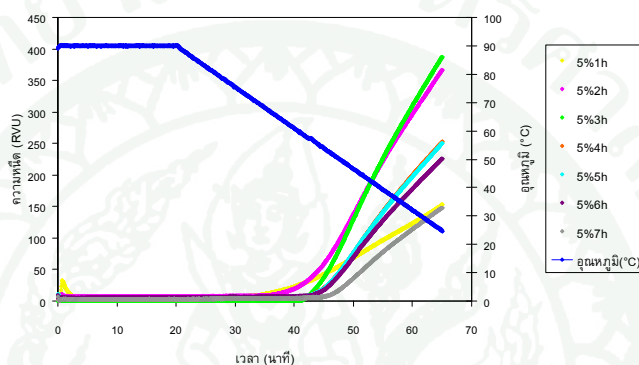


ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเป็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นกรดร้อยละ 1 (ก), 2 (ข), 3 (ค), 4 (ง), 5 (จ) และ 6 (ฉ) ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสด้วยเครื่อง RVA

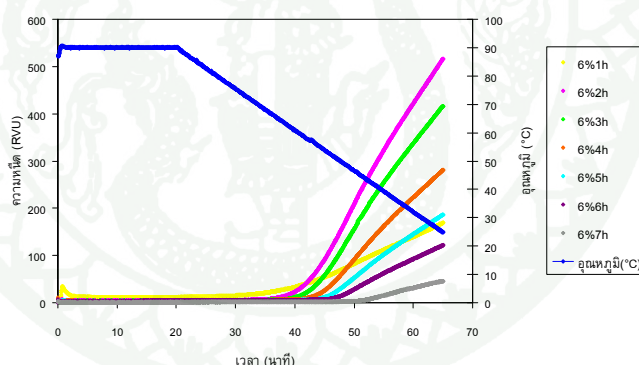
(ง) 4%HCl



(จ) 5%HCl



(ฉ) 6%HCl

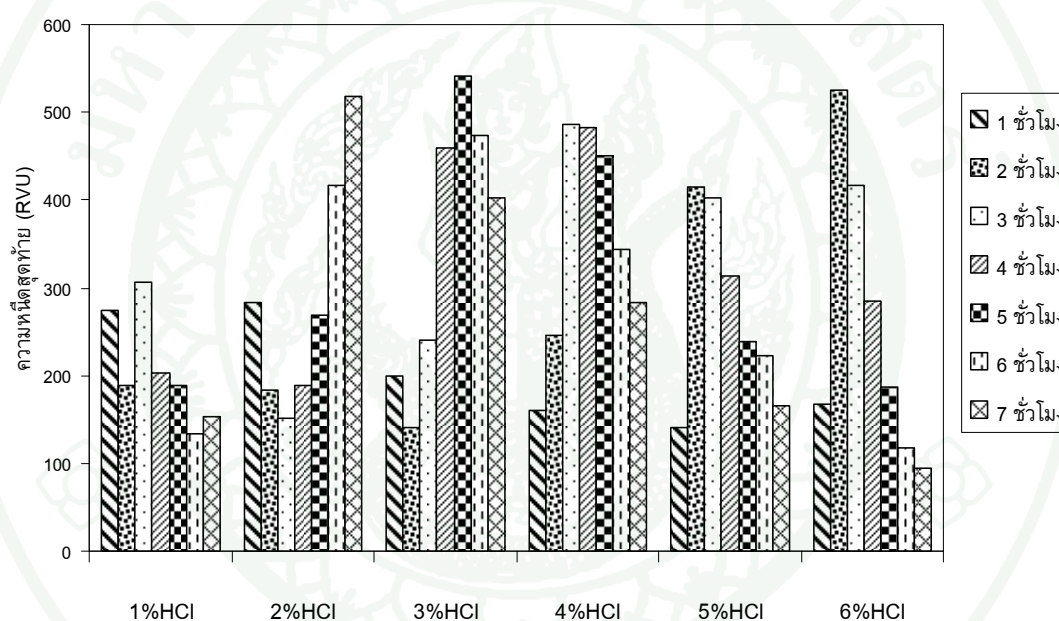


ภาพที่ 34 (ต่อ)

เมื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดในตัวอย่างแบ่ง และพิจารณาผลของความเข้มข้นต่อสมบัติด้านความหนืดของแบ่งตัดแปรจะเห็นว่า ที่สภาวะความเข้มข้นกรดร้อยละ 1 จะผลิตได้แบ่งตัดแปรที่มีความหนืดสูง ในขณะที่สภาวะความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้นจะได้แบ่งตัดแปรที่มีความหนืดขณะให้ความร้อนลดลงตามลำดับ (ภาพที่ 34)

ในระหว่างการตัดแปรแบ่งด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก นอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด และค่าการไหลเทียบกับน้ำแล้ว คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่ง คือ

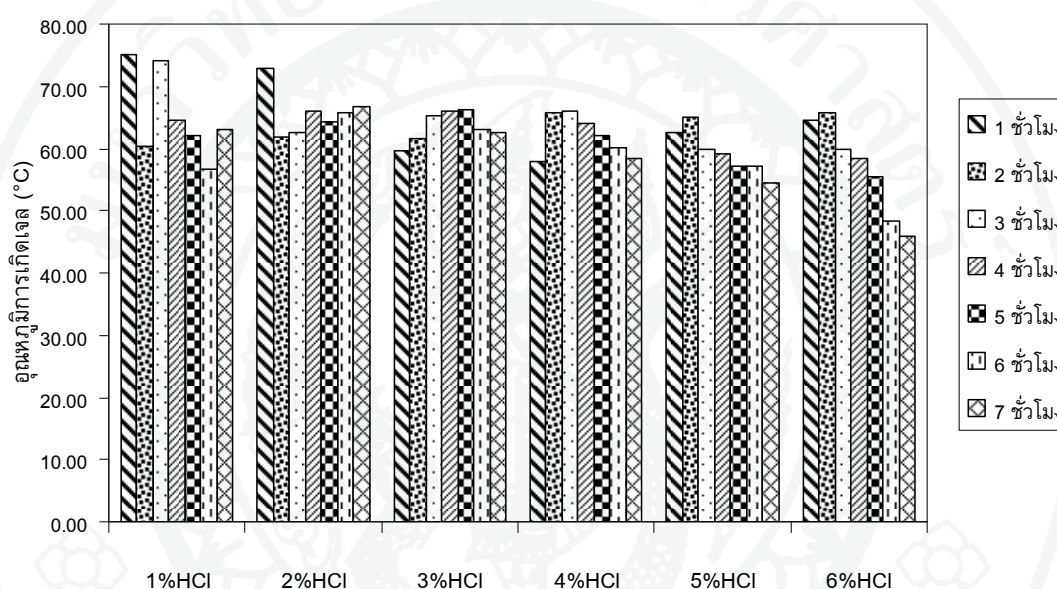
ความสามารถในการเกิดเจล เมื่อพิจารณาถึงความหนืดสุดท้ายซึ่งเป็นค่าตัวแปรในการบ่งบอกถึงคุณภาพของแป้งและเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของแป้งหรือผลิตภัณฑ์ว่ามีลักษณะเป็นแป้งเปียกหรือเจลเมื่อผ่านการให้ความร้อน และทำให้เย็น (Newport Scientific, 1995) เมื่อพิจารณาผลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่อความหนืดสุดท้ายของแป้งดัดแปรจะเห็นว่าที่สภาวะความเข้มข้นกรดร้อยละ 2 แป้งดัดแปรมีความหนืดสุดท้ายสูงสุดเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง เมื่อความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดสุดท้ายมีค่าสูงสุดที่เวลาการทำปฏิกิริยาลดลงกล่าวคือที่สภาวะความเข้มข้นกรดร้อยละ 3, 4, 5 และ 6 จะใช้เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 5, 3, 2 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ โดยที่สภาวะการดัดแปรที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมงจะมีความหนืดสุดท้ายสูงที่สุด (ภาพที่ 34 และ 35)



ภาพที่ 35 ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

แป้งย่อยด้วยกรดสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม เจลลี่ เส้นก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น แป้งที่เกิดการเจลลิ่งในเซชันแล้วเมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงมักจะเกิดเจลที่มีลักษณะขาวขุ่นและความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างแหสามมิติขึ้น โดยโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเข้ามาจับกันหรือจับกับอะมิโลเพกทินด้วยพันธะไฮโดรเจน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน ในอุตสาหกรรมกระบวนการทำผลิตภัณฑ์ดังกล่าว นอกจากต้องการความคงตัวของแป้งแล้ว ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้เกิดเจล ซึ่งมีผลต่อเวลา

ในกระบวนการผลิต หากแป้งที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วหรือนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ สามารถเกิดเจลได้ในเวลาอันรวดเร็ว นั้นหมายความว่าสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิสูงก็จะสามารถลดเวลาการผลิตได้ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์บางชนิด อุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจล ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ความหนืดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วขณะให้ความเย็น (Hanchett *et al.*, 2002) โดยใช้ Rapid Visco Analyser (RVU) (รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก) ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 36 และ ตารางที่ 15



ภาพที่ 36 อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์จากกราฟความหนืดด้วยเครื่อง RVA

จากภาพที่ 36 ผลการทดลองจะเห็นว่า แป้งดัดแปรที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 1 และ 2 อุณหภูมิการเกิดเจลสูงสุดที่เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 5 และ 6 อุณหภูมิการเกิดเจลสูงสุดที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนถึง 7 ชั่วโมง อุณหภูมิการเกิดเจลมีค่าต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาผลของเวลาการทำปฏิกิริยาต่ออุณหภูมิการเกิดเจลพบว่า เวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จะมีอุณหภูมิการเกิดเจลแคบ (60.40 ถึง 65.77 องศาเซลเซียส) เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นจนถึง 7 ชั่วโมง อุณหภูมิการเกิดเจลมีค่ากว้าง (48.03 ถึง 66.46 องศาเซลเซียส)

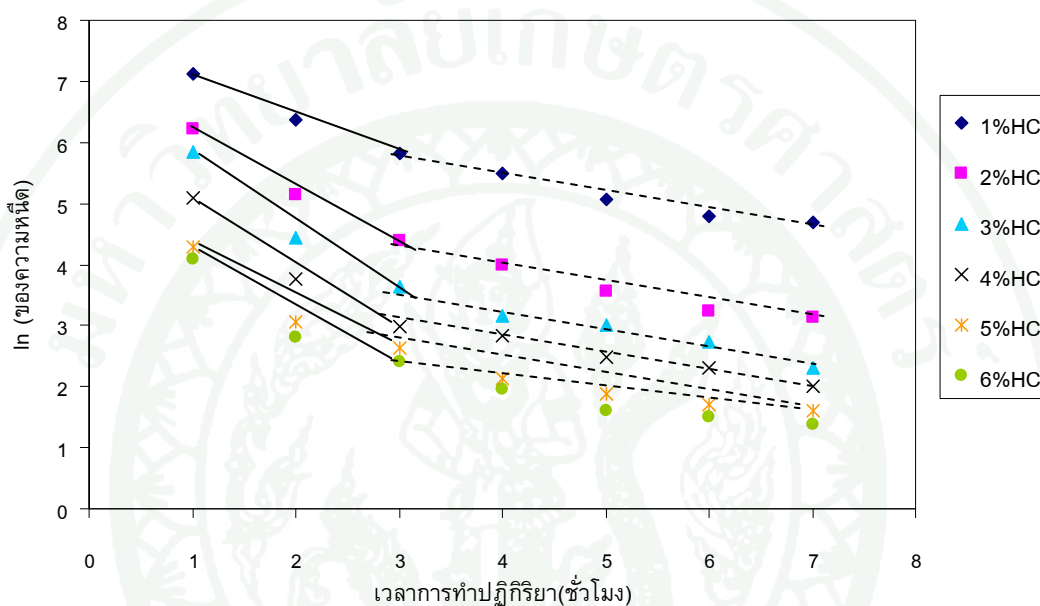
ตารางที่ 15 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA ¹

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ความหนืดสุดท้าย (RVU)						
	เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ชั่วโมง)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	273 ± 40 ^{ab,A}	189 ± 125 ^{ab,B}	307 ± 88 ^{a,B}	203 ± 6 ^{ab,CD}	189 ± 6 ^{ab,D}	133 ± 1 ^{b,E}	143 ± 8 ^{b,DE}
2	282 ± 10 ^{c,A}	182 ± 11 ^{d,B}	152 ± 17 ^{d,C}	188 ± 16 ^{d,D}	270 ± 27 ^{c,C}	417 ± 21 ^{b,B}	517 ± 11 ^{a,A}
3	199 ± 30 ^{d,B}	141 ± 9 ^{e,B}	240 ± 6 ^{d,BC}	460 ± 30 ^{b,A}	541 ± 2 ^{a,A}	473 ± 7 ^{b,A}	402 ± 45 ^{c,B}
4	159 ± 21 ^{f,BC}	246 ± 5 ^{e,B}	486 ± 19 ^{a,A}	446 ± 1 ^{b,A}	451 ± 4 ^{b,B}	344 ± 8 ^{c,C}	276 ± 1 ^{d,C}
5	140 ± 17 ^{d,C}	415 ± 18 ^{a,A}	402 ± 21 ^{a,A}	313 ± 86 ^{b,B}	239 ± 16 ^{bc,C}	222 ± 6 ^{cd,D}	166 ± 25 ^{cd,D}
6	171 ± 2 ^{e,BC}	536 ± 3 ^{a,A}	417 ± 8 ^{b,A}	285 ± 6 ^{c,BC}	187 ± 1 ^{d,D}	118 ± 5 ^{f,E}	94 ± 7 ^{g,E}
ความเข้มข้น (ร้อยละ)	อุณหภูมิการเกิดเจล (องศาเซลเซียส)						
	เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ชั่วโมง)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	75.11 ± 14.37 ^{a,A}	60.40 ± 16.55 ^{a,A}	74.23 ± 7.11 ^{a,A}	64.59 ± 1.26 ^{a,A}	62.20 ± 0.16 ^{a,C}	56.58 ± 0.19 ^{a,BC}	63.12 ± 0.57 ^{a,AB}
2	72.89 ± 2.25 ^{a,AB}	61.90 ± 1.20 ^{c,A}	62.59 ± 2.02 ^{c,AB}	65.91 ± 0.19 ^{b,A}	64.31 ± 0.00 ^{bc,B}	65.85 ± 0.06 ^{b,A}	66.70 ± 0.21 ^{b,A}
3	59.64 ± 4.14 ^{c,AB}	61.59 ± 1.99 ^{bc,A}	65.35 ± 0.18 ^{ab,AB}	66.03 ± 0.61 ^{a,A}	66.27 ± 0.51 ^{a,A}	63.13 ± 0.04 ^{abc,AB}	62.46 ± 0.86 ^{abc,B}
4	57.92 ± 3.48 ^{d,B}	65.89 ± 1.96 ^{a,A}	66.10 ± 0.78 ^{a,AB}	64.09 ± 0.26 ^{ab,A}	62.02 ± 0.63 ^{bc,C}	60.10 ± 0.21 ^{cd,AB}	58.43 ± 0.37 ^{cd,C}
5	62.46 ± 2.53 ^{ab,AB}	65.12 ± 2.80 ^{a,A}	59.81 ± 9.00 ^{ab,B}	59.14 ± 2.17 ^{ab,B}	57.22 ± 0.17 ^{ab,D}	57.18 ± 0.47 ^{ab,B}	54.41 ± 1.26 ^{b,D}
6	64.58 ± 0.39 ^{a,AB}	65.77 ± 0.98 ^{a,A}	59.76 ± 3.02 ^{ab,B}	58.48 ± 0.31 ^{ab,B}	55.39 ± 0.27 ^{bc,E}	48.30 ± 8.49 ^{cd,C}	48.03 ± 6.44 ^{d,E}

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.2 อัตราการเกิดปฏิกิริยา

การย่อยแบ่งด้วยกรด กรดจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะไกลโคซิดิก ทำให้สายสั้นลงโดยที่พันธะแอลฟา 1,4 ไกลโคซิดิก จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าพันธะแอลฟา 1,6 ไกลโคซิดิก (Wurzburg, 1986) ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของแป้งลดลง แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ค่า \ln ของความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

พบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดัดแปร แบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกความหนืดที่เกิดจากการย่อยลดลงอย่างรวดเร็ว และระยะที่สองความหนืดลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งดัดแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยา สภาวะที่ผลิตได้แป้งดัดแปรที่มีความหนืดลดต่ำอย่างรวดเร็วจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างสูง ในทางกลับกันในกรณีของแป้งดัดแปรที่มีความหนืดลดลงอย่างช้าๆ จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่า จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า \ln ของความหนืดกับเวลาการทำปฏิกิริยา เมื่อนำมาคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแป้งดัดแปรจะได้สมการจากการคำนวณ ดังนี้

$$Y = AX + B \quad (1)$$

$$\ln(V) = A(t) + B; B = \ln(V_0), A = -k \quad (2)$$

$$\ln(V) - B = A(t) \quad (3)$$

$$\ln(V) - \ln(V_0) = A(t) \quad (4)$$

$$\ln(V/V_0) = A(t) \quad (5)$$

$$V/V_0 = e^{A(t)} \quad (6)$$

$$V = V_0(e^{A(t)}) \quad (7)$$

$$V = V_0(e^{-k(t)}) \quad (8)$$

V คือ ความหนืด (cP)

V_0 คือ ความหนืดเริ่มต้น (cP)

t คือ เวลา (ชั่วโมง)

k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate constant)

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงที่ใช้อธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ
แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและ
ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส¹

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (ร้อยละ)	Yi = -k(t) + B		R^2_1	R^2_2
	ค่า ln ของความหนืด(Yi)	k ₁ k ₂		
1		0.6455 0.2978	0.9909	0.9642
2		0.9143 0.3268	0.9882	0.9612
3		1.0982 0.3086	0.9768	0.9708
4		1.0459 0.2492	0.9747	0.9893
5		0.8223 0.2495	0.9292	0.9090
6		0.8419 0.2465	0.9178	0.9084

หมายเหตุ ¹ สมการเส้นตรง : $Y_i = -k(t) + B$

กำหนดให้ Y_i คือ ค่า ln ของความหนืด

k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ช่วงที่ 1 (1 ถึง 3 ชั่วโมง)

k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ช่วงที่ 2 (3 ถึง 7 ชั่วโมง)

t คือ เวลา (ชั่วโมง)

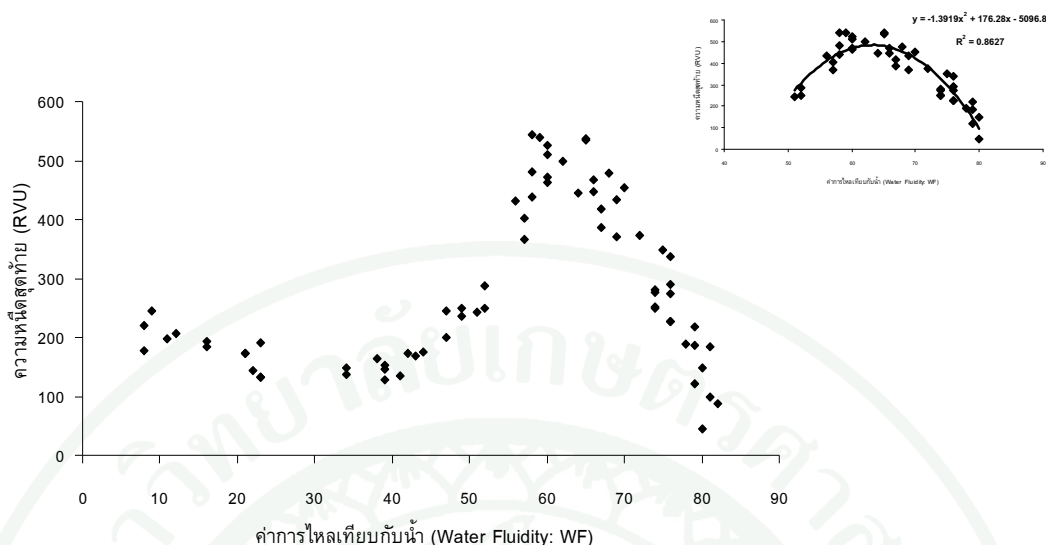
B คือ ค่า ln ของความหนืดเริ่มต้น

จากการทดลองพบว่าค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแป้งดัดแปรสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ แป้งดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 และ ร้อยละ 1 ตามลำดับ โดยมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1.0982 และ 0.6455 ตามลำดับ (ตารางที่ 16)

2.3 สมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด

โดยทั่วไปคุณสมบัติของแป้งย่อยด้วยกรดที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกันที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ชนิดของกรด และสภาวะที่ใช้ในการดัดแปร เช่น ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในการผลิตแป้งย่อยกรด เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ และเหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการคัดเลือกแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดที่มีคุณสมบัติการเกิดเจลที่ดี

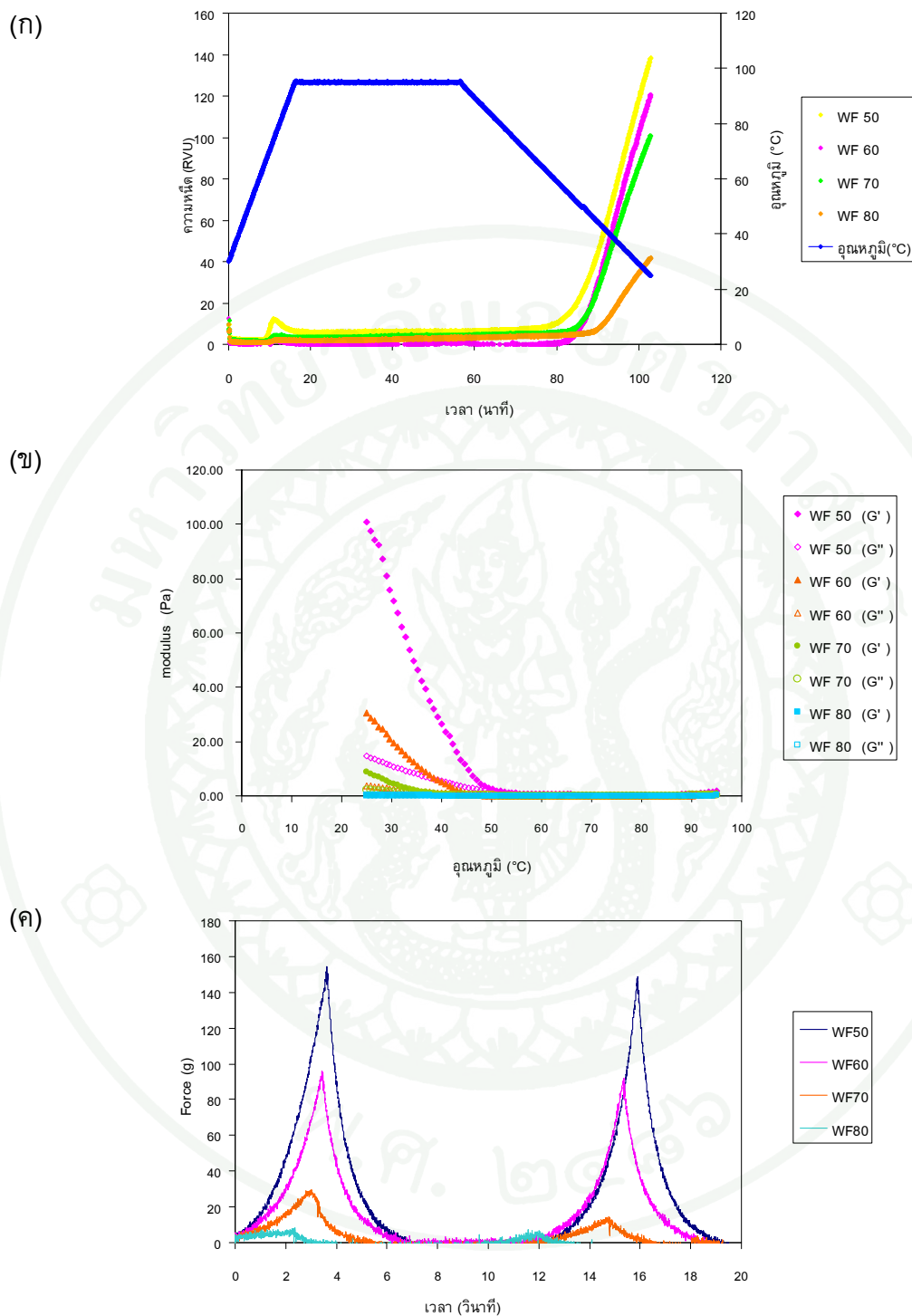
เมื่อจัดกลุ่มความหนืดสุดท้ายตามค่าการไหลเทียบกับน้ำ พบว่า แป้งดัดแปรที่ให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงที่สุด คือ แป้งดัดแปรกลุ่มที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำเท่ากับ 65 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 491 RVU รองลงมา คือ แป้งดัดแปรกลุ่มที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำเท่ากับ 60, 70 และ 75 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 472, 429 และ 286 RVU ตามลำดับ และค่าความหนืดสุดท้ายน้อยที่สุด คือ แป้งดัดแปรกลุ่มที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำเท่ากับ 80 โดยมีค่าเฉลี่ยความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 173 RVU (ภาพที่ 38)



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสุดท้ายกับค่าการไหลเทียบกับน้ำ ช่วง 0 ถึง 100 (ภาพใหญ่) และช่วง 50 ถึง 80 (ภาพเล็ก) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสภาวะที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

มีรายงานการนำแป้งสาकुดัดแปรด้วยกรดมาใช้ในการผลิตภัณฑ์ที่เกิดเจล โดยพบว่า แป้งสาकुจะเกิดเจลได้ดีเมื่อมีค่าการไหลเทียบกับน้ำเท่ากับ 67 ในขณะที่แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวสาลี และแป้งมันฝรั่ง จะเกิดเจลได้ดีเมื่อมีค่าการไหลเทียบกับน้ำเท่ากับ 65 (Hanchett *et al.*, 2002) สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตลูกกวาดในผลิตภัณฑ์ประเภทกัม (gum) และเจลลี่ (jelly) จะใช้แป้งดัดแปรด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำอยู่ในช่วง 60 ถึง 75 (James, n.d.) ดังนั้นเพื่อศึกษาสมบัติการเกิดเจลของแป้งดัดแปรด้วยกรดด้วยวิธีทางรีโอโอโลยีและลักษณะ เนื้อสัมผัสจึงเลือกแป้งดัดแปรด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำในช่วง 50 ถึง 80 โดยค่าการไหลเทียบกับน้ำ 50, 60, 70 และ 80 มีสภาวะการดัดแปรที่ความเข้มข้นกรดร้อยละ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ที่เวลาการทำปฏิกิริยาเดียวกันคือที่เวลาการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ ความหนืดสุดท้ายด้วยเครื่อง RVA ที่ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 39 (ก) และตารางที่ 17) พบว่าความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 มีค่าสูงสุดในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าต่ำสุด ผลการทดลองมีแนวโน้มที่แตกต่างจากการวิเคราะห์ค่าความหนืดสุดท้ายด้วย RVA ในภาพที่ 38 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ความเข้มข้น แป้งร้อยละ 15 พฤติกรรมที่แป้งดัดแปร WF 50 ให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงสุด เมื่อความเข้มข้น แป้งร้อยละ 10 ในขณะที่แป้งดัดแปร WF 60 ให้ค่าความหนืดสุดท้ายสูงสุด เมื่อความเข้มข้น

แป้งร้อยละ 15 อาจเป็นเพราะแป้งที่ระดับความเข้มข้นต่างกันมีความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งต่างกัน โดยมีรายงานว่าแป้งดิบแต่ละชนิดจะมีค่า close packing volume (C^*) ที่แตกต่างกัน ค่า C^* คือค่าความเข้มข้นของน้ำแป้งที่เม็ดแป้งสามารถพองตัวเต็มปริมาตรที่มีในน้ำแป้งนั้นๆ ในกรณีที่น้ำแป้งมีความเข้มข้นต่ำกว่า C^* เม็ดแป้งจะพองตัวได้อย่างเต็มที่และเป็นอิสระ ในขณะที่น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นมากกว่า C^* เม็ดแป้งจะไม่สามารถพองตัวได้อย่างอิสระ และส่งผลต่อสมบัติรีโอโลยีของน้ำแป้งนั้น ซึ่งเป็นอิทธิพลจากความแข็งแรงของเม็ดแป้งที่พองตัวไม่เต็มที่ (Vandeputte *et al.*, 2003) เมื่อพิจารณาค่า storage modulus (G') และ $\tan \delta$ ด้วยเครื่อง rheometer และลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer ที่ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 39 (ข),(ค) และตารางที่ 17 พบว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 มีค่า G' และค่าความแข็งของเจลสูงที่สุด ในขณะที่ค่า $\tan \delta$ มีค่าต่ำ เมื่อมีการดัดแปรเพิ่มขึ้น พบว่าแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 ค่า G' และค่าความแข็งของเจลต่ำที่สุด แต่มีค่า $\tan \delta$ ไม่แตกต่าง



ภาพที่ 39 สมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด : การเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง (RVA) (ก), ค่า modulus ด้วยเครื่อง rheometer (ข), ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง texture analyzer (ค)

ตารางที่ 17 สมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด^{1,2}

ค่าการไหล เทียบกับน้ำ (Water Fluidity)	สภาวะการ เตรียม	ความหนืด สุดท้าย (RVU)	ค่า storage modulus (G', Pa)	tan δ	ความแข็ง (Hardness, กรัม)
50	2%HCl	133±7 ^A	97±6 ^A	0.14±0.00 ^B	152±2 ^A
60	3%HCl	121±0 ^B	31±1 ^B	0.12±0.01 ^B	97±4 ^B
70	4%HCl	99±3 ^C	9±1 ^C	0.23±0.04 ^A	26±3 ^C
80	6%HCl	41±0 ^D	5±1 ^D	0.12±0.01 ^B	8±0 ^D

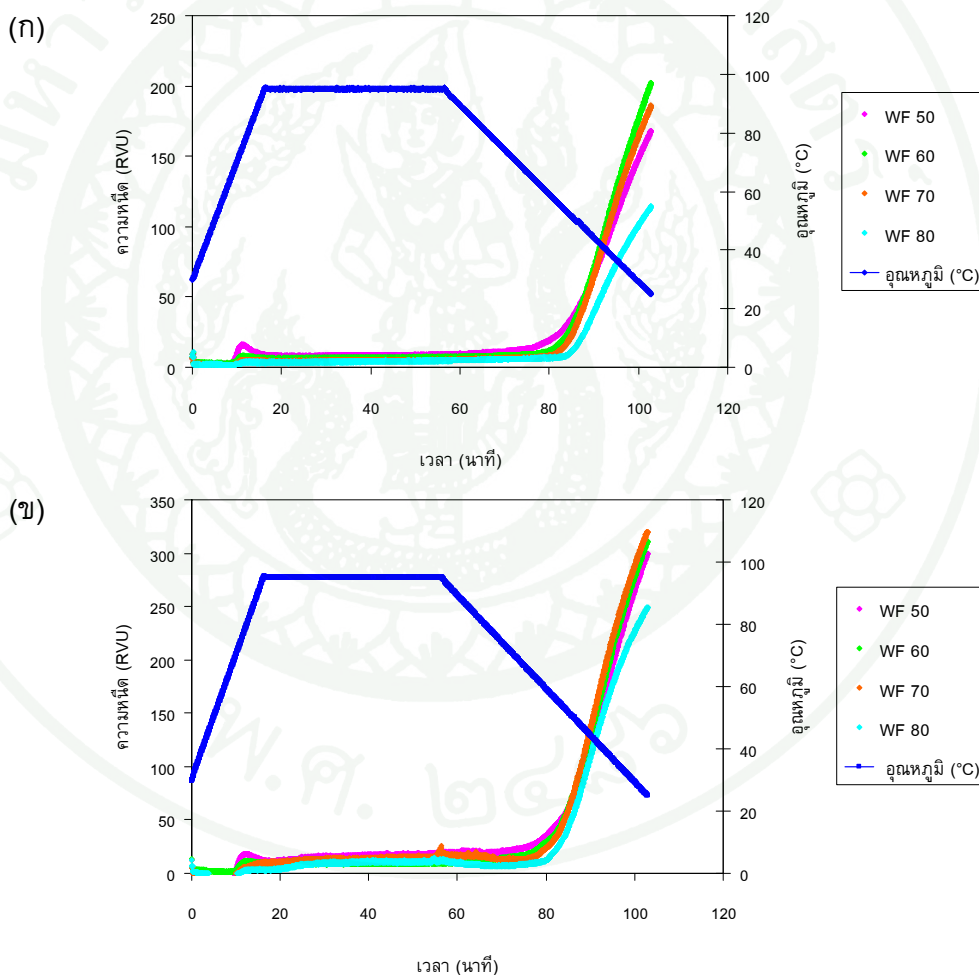
หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่าง
มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

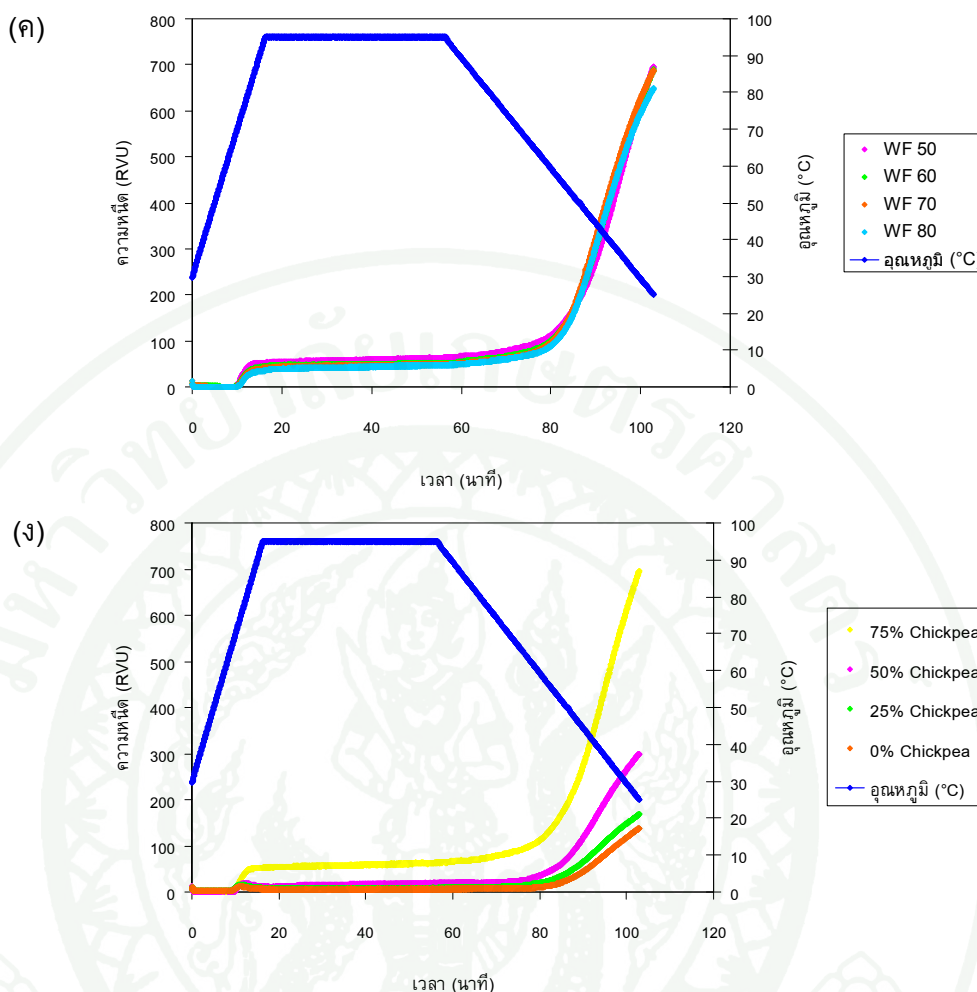
3. การศึกษาผลของแบ่งหัวข้างและแบ่งหัวเขี้ยวต่อสมบัติรีโอโลยีของ แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยกรด

3.1 ผลของแบ่งหัวข้างต่อสมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลัง

เมื่อนำแบ่งหัวข้างมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังตัดแปร 4 ระดับ ตามค่าการไหลเทียบกับน้ำ คือ 50, 60, 70 และ 80 ตามลำดับ ในอัตราส่วน ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นรวมของแป้งผสมทั้งหมด ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ได้แป้งผสมซึ่งผ่านการวิเคราะห์พฤติกรรมความหนืดด้วยเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรดผสมกับแบ่งหัวข้างที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งตัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแบ่งหัวข้างที่อัตราส่วนต่างๆ (ง) ด้วยเครื่อง RVA

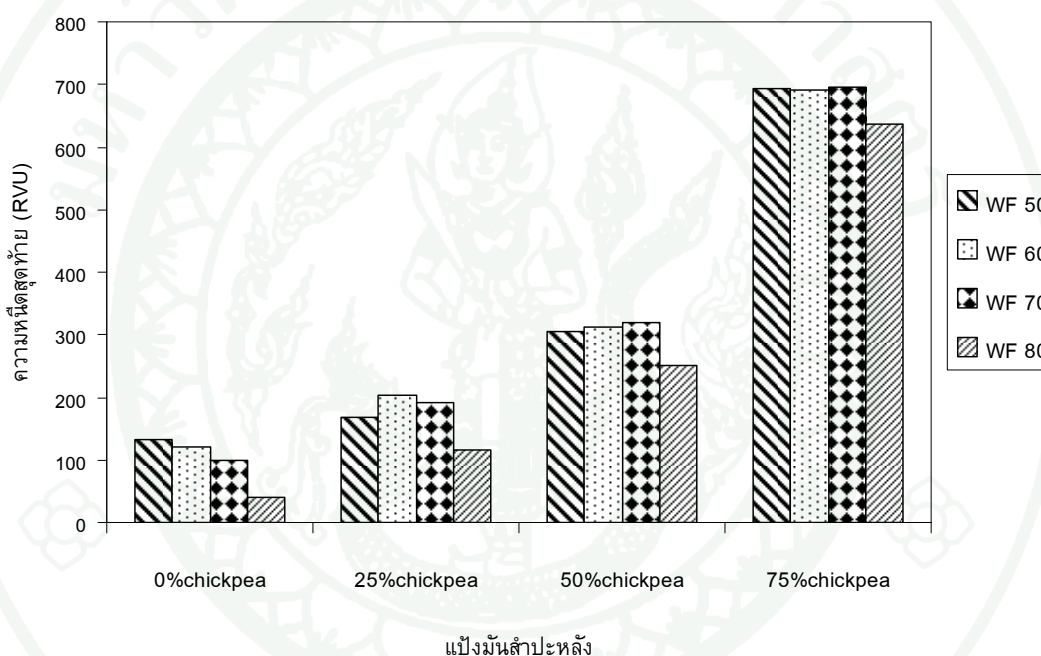


ภาพที่ 40 (ต่อ)

จากภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งผสมขณะให้ความร้อนมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า ความชื้นมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของแป้งดัดแปรด้วยกรด (ภาพที่ 40 (ก), (ข), (ค)) หากพิจารณาถึงผลของการเติมแป้งถั่วหัวช้าง พบว่า เมื่อแป้งถั่วหัวช้างมีปริมาณเพิ่มขึ้นความชื้นของแป้งผสมที่ค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันในแป้งผสมทั้ง 4 ระดับ (ภาพที่ 40 (ง))

เมื่อพิจารณาถึงความชื้นสุดท้ายซึ่งเป็นค่าตัวแปรในการบ่งบอกถึงคุณภาพของแป้งและเป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะของแป้งหรือผลิตภัณฑ์ว่ามีลักษณะเป็นแป้งเปียกหรือเจลเมื่อผ่านการให้ความร้อน และทำให้เย็น (Newport Scientific, 1995) พบว่า ค่าความชื้นสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีแป้งถั่วหัวช้าง และค่าความชื้นสุดท้ายจะเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนของแป้งถั่วหัวช้างเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 40, 41 และตารางที่ 18) ทั้งนี้ความชื้น

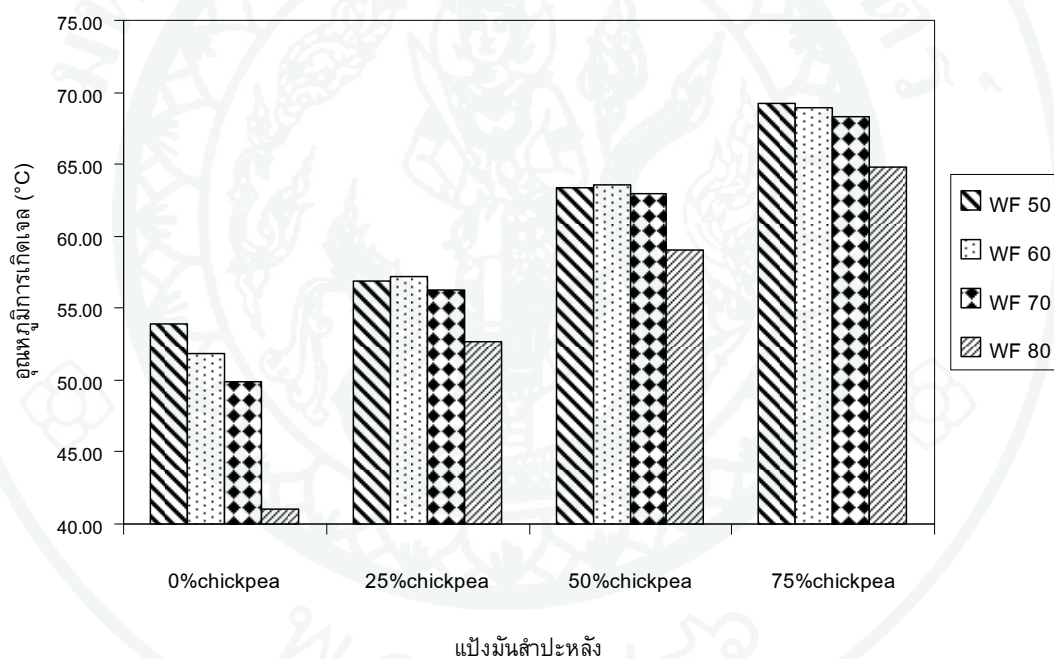
สุดท้ายมีความสอดคล้องกับปริมาณอะมิโลส โดยถ้าปริมาณอะมิโลสมากค่าความหนืดสุดท้ายก็จะมีค่ามากด้วย เนื่องจากแป้งเปียกเมื่อถูกลดอุณหภูมิลง อะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเข้ามาจัดเรียงตัวกันใหม่ มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและจะเกิดได้เร็วเมื่ออะมิโลสมีขนาด 100-200 หน่วยกลูโคส (Sander, 1996; Whistler and BeMiller, 1999) ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด 2 ชนิด ได้แก่ WF 60 และ WF 70 มีค่าเท่ากันเมื่อผสมแป้งถั่วหัวช้างปริมาณร้อยละ 25, 50 และ 75 และมีค่ามากกว่าแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด WF 50 ที่เป็นแป้งผสม ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด WF 50 มีค่าความหนืดสุดท้ายมากที่สุดในการแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรดที่ไม่มีแป้งถั่วหัวช้างผสม



ภาพที่ 41 ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิในการเกิดเจล ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งในกระบวนการผลิต กล่าวคือ หลังจากแป้งได้รับความร้อนจนกระทั่งเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กกระจายออกมา ซึ่งจะกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นร่างแหสามมิติเกิดลักษณะเจล เมื่อมีอุณหภูมิลดต่ำลง หากอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงในกระบวนการแปรรูปซึ่งเป็นข้อดีที่ไม่ต้องใช้ความเย็นในการลดอุณหภูมิของแป้งเพื่อให้เกิดเจลก็สามารถลดเวลาในกระบวนการผลิตได้ (Hanchett *et al.*, 2002) จากการทดลองแสดงในภาพที่ 42 และตารางที่ 18 พบว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลของแป้งผสมมีค่าสูงขึ้น เมื่อผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ ใน

ทุกตัวอย่างแป้ง จากการคำนวณร้อยละอุณหภูมิในการเกิดเจลที่เปลี่ยนไปสามารถเรียงลำดับอุณหภูมิที่เปลี่ยนเมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างจากมากไปน้อย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 ซึ่งสามารถคำนวณอุณหภูมิในการเกิดเจลที่เปลี่ยนไปจากอุณหภูมิการเกิดเจลของตัวอย่างที่มีการผสมแป้งถั่วหัวช้างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเกิดเจลของตัวอย่างที่ไม่มีการผสม โดยมีค่าร้อยละอุณหภูมิในการเกิดเจลที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 75 มากที่สุด เท่ากับร้อยละ 57.74 และ ร้อยละ 28.56 สำหรับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการผสมแป้งถั่วหัวช้างที่ระดับเดียวกัน แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีอุณหภูมิการเกิดเจลต่ำที่สุด ขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ระดับอื่นมีค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 42 อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยการผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 18 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วย RVA^{1,2,3}

แป้งมันสำปะหลัง	ความหนืดสุดท้าย (RVU)			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วหัวช้าง (ร้อยละ)			
	0	25	50	75
WF 50	133 ± 7 ^{d,A}	168 ± 1 ^{c,B}	305 ± 7 ^{b,A}	693 ± 5 ^{a,A}
WF 60	121 ± 0 ^{d,B}	203 ± 1 ^{c,A}	313 ± 3 ^{b,A}	692 ± 2 ^{a,A}
WF 70	99 ± 3 ^{d,C}	192 ± 8 ^{c,A}	320 ± 1 ^{b,A}	695 ± 9 ^{a,A}
WF 80	41 ± 0 ^{d,D}	116 ± 2 ^{c,C}	251 ± 2 ^{b,A}	637 ± 18 ^{a,B}
แป้งมันสำปะหลัง	อุณหภูมิการเกิดเจล (องศาเซลเซียส)			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วหัวช้าง (ร้อยละ)			
	0	25	50	75
WF 50	53.88 ± 0.51 ^{d,A}	56.85 ± 0.08 ^{c,A}	63.42 ± 0.73 ^{b,A}	69.27 ± 0.80 ^{b,A}
WF 60	51.80 ± 0.01 ^{d,AB}	57.23 ± 0.10 ^{c,A}	63.60 ± 0.35 ^{b,A}	68.91 ± 1.94 ^{a,A}
WF 70	49.83 ± 0.23 ^{d,B}	56.27 ± 0.38 ^{c,A}	62.94 ± 0.76 ^{b,A}	68.27 ± 2.08 ^{a,B}
WF 80	41.08 ± 0.31 ^{d,C}	52.62 ± 0.45 ^{c,A}	59.09 ± 0.08 ^{b,B}	64.80 ± 0.40 ^{a,B}

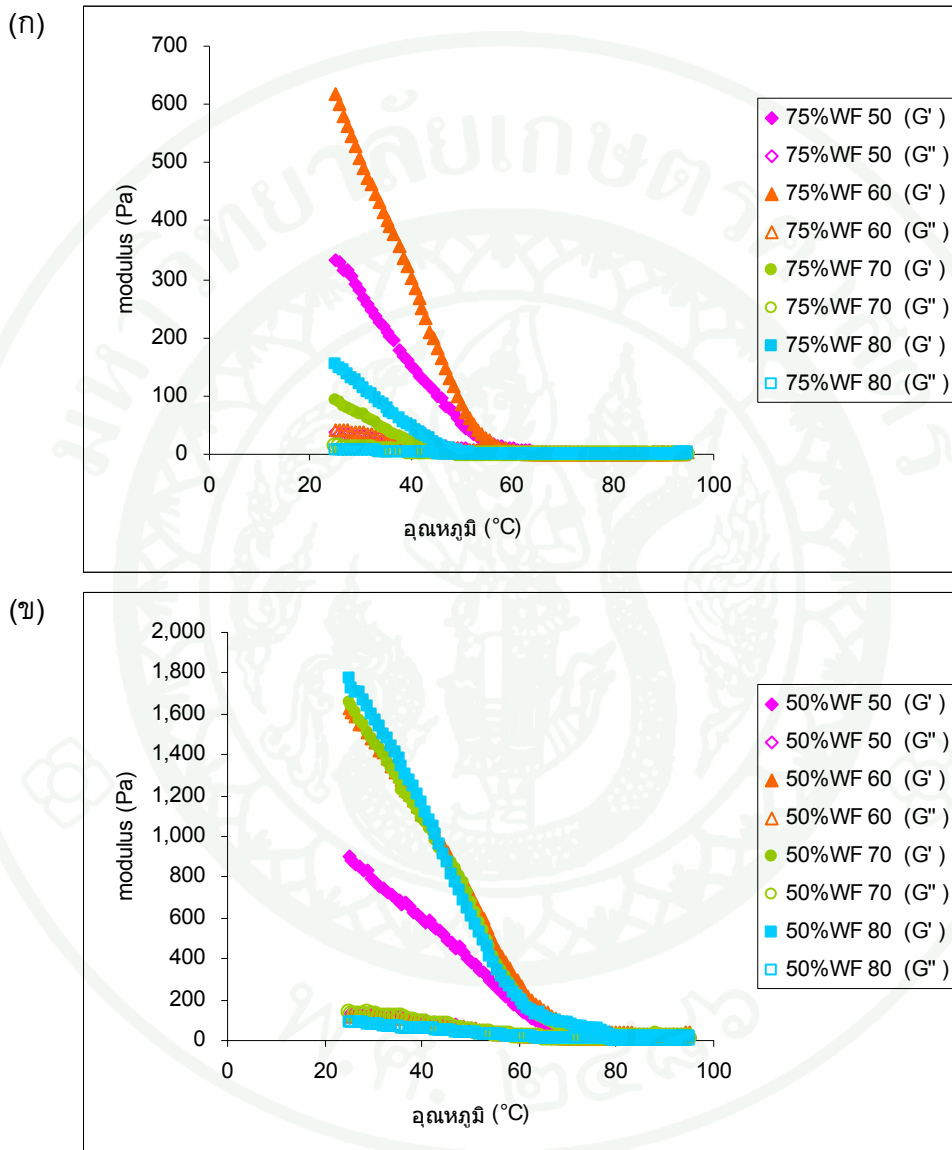
หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² WF 50 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 50
WF 60 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 60
WF 70 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 70
WF 80 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 80

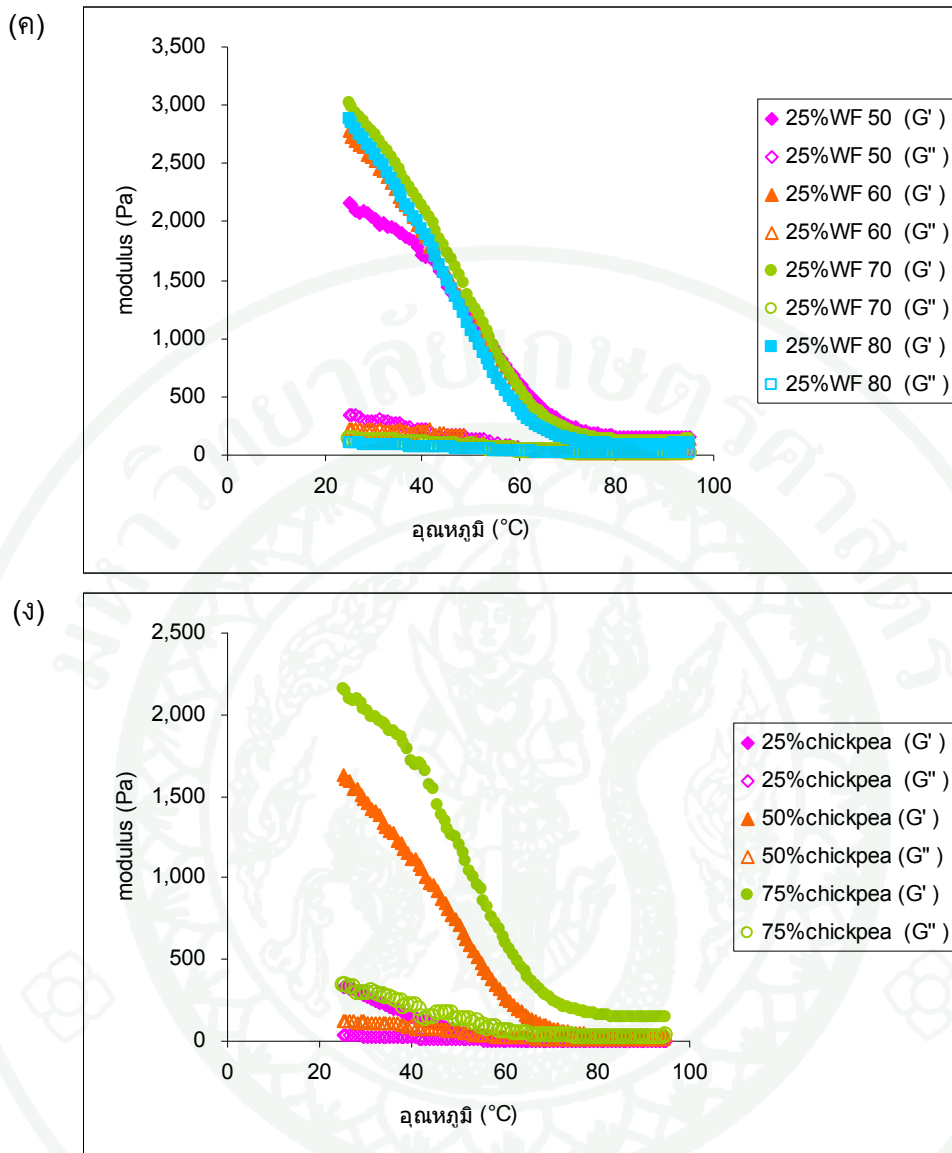
³ ความหนืดสุดท้ายของแป้งถั่วหัวช้างเท่ากับ 936±47 RVU

อุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลของแป้งถั่วหัวช้างเท่ากับ 94.09±0.05 องศาเซลเซียส

สมบัติวิภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด 4 ระดับผสมแป้งหัวช้างที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขณะทำให้เย็นที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 43, 44 และตารางที่ 19



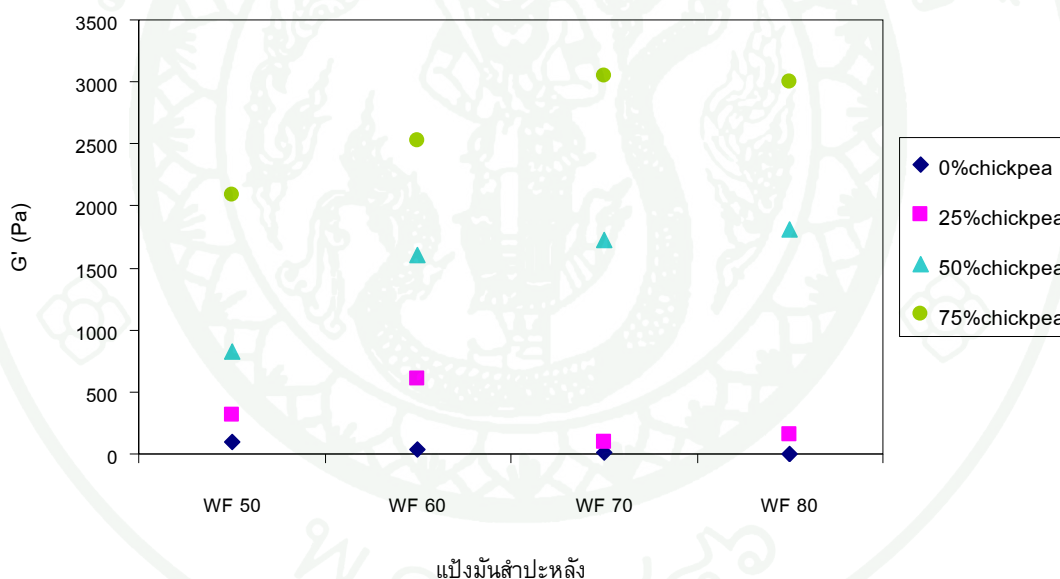
ภาพที่ 43 Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งหัวช้างที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแป้งหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ (ง)



ภาพที่ 43 (ต่อ)

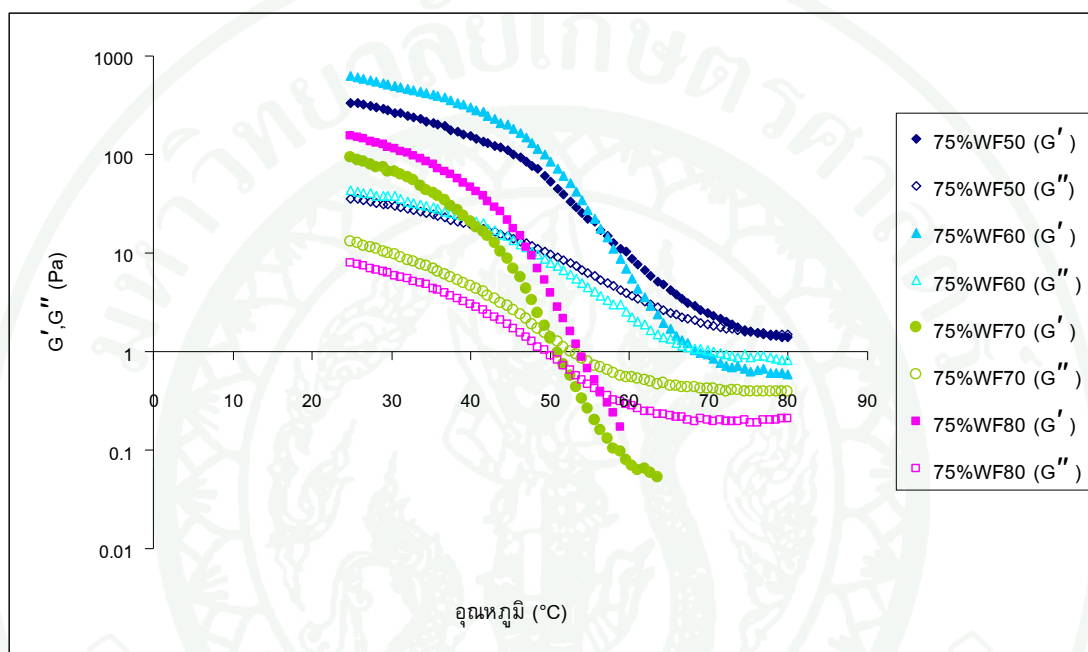
จากการศึกษา พบว่า แป้งถั่วหัวช้างมีค่า G' สูง คือ 3,831 Pa แสดงว่าแป้งถั่วหัวช้างมีลักษณะเจลที่แข็ง เนื่องจากองค์ประกอบของอะมิโลสมากกว่า ส่วนแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 4 ระดับ มีค่า G' เท่ากับ 97, 31, 9 และ 5 Pa ตามลำดับ แสดงว่ามีคุณสมบัติการเกิดเจลได้ไม่ดี หรือได้เจลที่อ่อนนุ่ม การผสมแป้งถั่วหัวช้างทำให้ค่า G' เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกัน แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 ซึ่งมีค่า G' ต่ำสุด การผสมแป้งถั่วหัวช้างทำให้แป้งผสมมีค่า G' เพิ่มขึ้น โดยมีค่า 162, 1,809 และ 2,997 Pa เมื่อผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ เมื่อผสมแป้งถั่วหัวช้างที่ร้อยละ 25 พบว่า แป้งผสมของ

แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 มีค่า G' สูงที่สุดในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 มีค่า G' ต่ำสุด เมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างที่ร้อยละ 50 และมีค่า G' ไม่แตกต่างกันในแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างที่ร้อยละ 75 แสดงให้เห็นว่าการผสมแป้งถั่วหัวช้างมีผลทำให้คุณสมบัติการเกิดเจลในระบบดีขึ้น ขณะเดียวกันอิทธิพลของระดับการดัดแปรแป้งด้วยกรดจะลดลง เมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 43 (ก) เปรียบเทียบกับภาพที่ 43 (ข) และ (ค) ตามลำดับ สำหรับ Loss factor (damping factor) หรือ $\tan \delta$ เป็นอัตราส่วนของค่า loss modulus (G'') กับค่า storage modulus (G') ซึ่งบอกลักษณะของเจลได้โดย $\tan \delta$ มีค่ามากเจลจะหนึ่ ถ้า $\tan \delta$ มีค่าน้อยเจลจะแข็ง จากตารางที่ 19 พบว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่า $\tan \delta$ น้อย ($\tan \delta < 0.1$) เมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างตั้งแต่ร้อยละ 25 เป็นต้นไป ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 การผสมแป้งถั่วหัวช้างทำให้ค่า $\tan \delta$ น้อย ที่ร้อยละ 50 และร้อยละ 75 ตามลำดับ



ภาพที่ 44 Storage modulus (G') ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อมีการลดอุณหภูมิลงจาก 95 องศาเซลเซียส ถึง 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 45) G' และ G'' มีค่าเพิ่มขึ้น และจุดที่ G' และ G'' มาไขว้กันกล่าวคือ จุดที่ค่า G' และ G'' เท่ากัน ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดที่เกิดเจล (gelling point) (Rao, 1999) การผสมแป้งหัวช้างร้อยละ 25 กับ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50, WF 60, WF 70 และ WF 80 สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิ 76, 69, 50 และ 57 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 45 Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย กรดที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ผสมกับแป้งหัวช้างที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ขณะทำให้เย็น

ตารางที่ 19 สมบัติวิฤภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ^{1,2,3}

แป้งมันสำปะหลัง	Storage modulus (G')(Pa)			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วหัวช้าง (ร้อยละ)			
	0	25	50	75
ดิบ	65 ± 1 ^{c,B}	149 ± 4 ^{c,C}	396 ± 48 ^{b,D}	1696 ± 42 ^{a,C}
WF 50	97 ± 6 ^{d,A}	322 ± 16 ^{c,B}	825 ± 112 ^{b,C}	2093 ± 90 ^{a,BC}
WF 60	31 ± 1 ^{d,C}	608 ± 13 ^{c,A}	1601 ± 46 ^{b,B}	2523 ± 360 ^{a,B}
WF 70	9 ± 1 ^{c,D}	94 ± 3 ^{c,D}	1725 ± 93 ^{b,AB}	3053 ± 45 ^{a,A}
WF 80	5 ± 1 ^{c,D}	162 ± 8 ^{c,C}	1809 ± 60 ^{b,A}	2997 ± 165 ^{a,A}

แป้งมันสำปะหลัง	tan δ			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วหัวช้าง (ร้อยละ)			
	0	25	50	75
ดิบ	0.31 ± 0.01 ^{a,A}	0.21 ± 0.00 ^{b,A}	0.16 ± 0.01 ^{c,A}	0.08 ± 0.00 ^{d,BC}
WF 50	0.14 ± 0.00 ^{b,C}	0.12 ± 0.01 ^{c,C}	0.15 ± 0.01 ^{b,A}	0.16 ± 0.00 ^{a,A}
WF 60	0.12 ± 0.01 ^{a,C}	0.07 ± 0.00 ^{a,D}	0.14 ± 0.01 ^{a,A}	0.13 ± 0.06 ^{a,AB}
WF 70	0.23 ± 0.04 ^{a,B}	0.14 ± 0.01 ^{b,B}	0.08 ± 0.00 ^{bc,B}	0.05 ± 0.01 ^{a,C}
WF 80	0.12 ± 0.01 ^{a,C}	0.05 ± 0.00 ^{b,E}	0.05 ± 0.00 ^{b,C}	0.04 ± 0.01 ^{a,C}

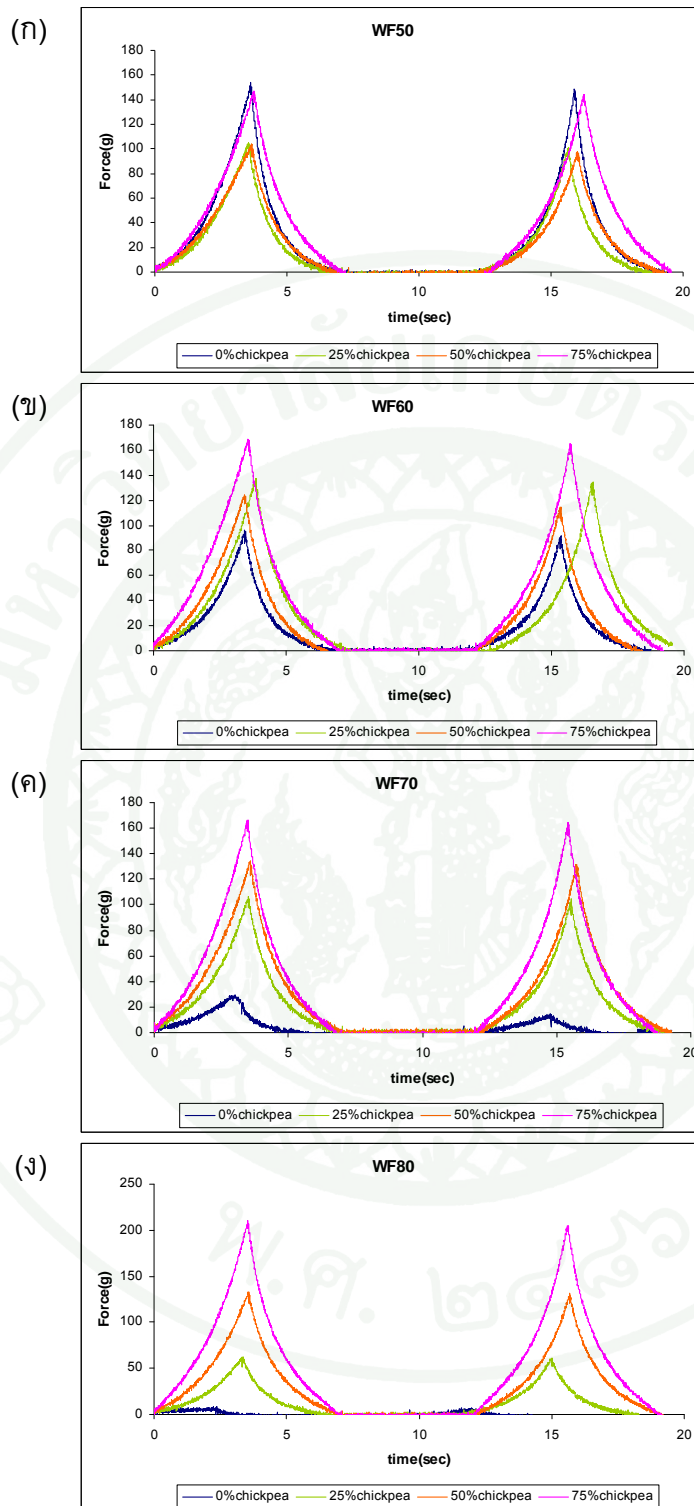
หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² WF 50 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 50
WF 60 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 60
WF 70 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 70
WF 80 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 80

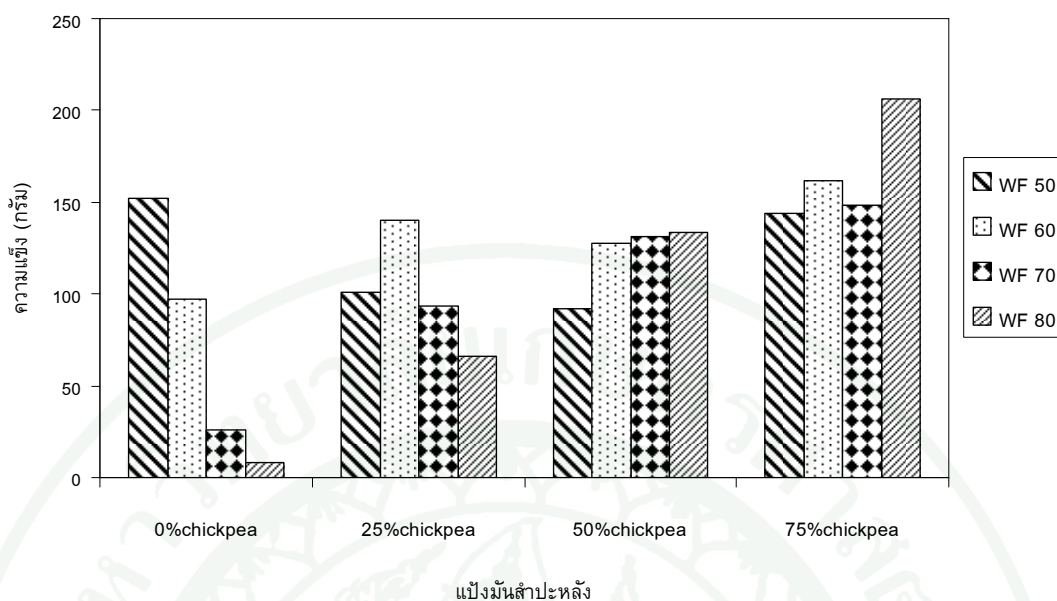
³ Storage modulus (G') ของแป้งถั่วหัวช้างเท่ากับ 3,831±139 Pa
tan δ ของแป้งถั่วหัวช้างเท่ากับ 0.03±0.00

ทั้งนี้วิธีการวัดค่าความหนืดสุดท้ายโดยเครื่อง RVA และคุณสมบัติวัฏภาคการไหล เป็นการวัดในลักษณะของของไหล และ viscoelasticity ของตัวอย่างตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ยังคงวิเคราะห์สมบัติที่เป็นของแข็งโดยทำการตรวจวัดลักษณะเนื้อสัมผัสซึ่งจะช่วยบ่งบอกได้ว่า เจลมีคุณภาพเป็นอย่างไร เช่น แข็งแต่มีความยืดหยุ่น หรือ แข็งแต่แตกเปราะ โดยใช้การวัดค่าแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ซึ่งใช้อธิบายถึงพฤติกรรมของเจลแบ่งได้ เมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความยืดหยุ่น (Springiness) ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess) ของเจลแบ่งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 46, 47 และตารางที่ 20 เมื่อพิจารณาผลของแป้งที่มีต่อค่า Hardness หรือความแข็งของเจล พบว่า ความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดิบ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 และ WF 80 มีค่าเพิ่มขึ้นตามการผสมของแป้งถั่วหัวช้าง แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น จาก 97 เป็น 161, 140 และ 128 เมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้าง ที่อัตราส่วนร้อยละ 75, 25 และ 50 ตามลำดับ ในขณะที่การผสมของแป้งถั่วหัวช้าง ไม่ได้เพิ่มความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 การผสมแป้งถั่วหัวช้างในอัตราส่วนร้อยละ 25 มีผลทำให้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าความแข็งต่ำสุด เมื่อเพิ่มการผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 50 ทำให้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60, WF 70 และ WF 80 มีค่าความแข็งเท่ากัน และเมื่อมีการเพิ่มการผสมแป้งถั่วหัวช้างเป็นร้อยละ 75 กลับทำให้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าความแข็งมากที่สุด ขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 และ WF 70 ยังคงมีค่าความแข็งเท่ากัน



ภาพที่ 46 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเจลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง
ดัดแปรด้วยกรด WF 50 (ก), WF 60 (ข), WF 70 (ค), WF 80 (ง) ผสมกับแป้ง
ถั่วหัวช้างที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 47 ความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด 4 ระดับผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลของแป้งที่มีต่อค่า Springiness หรือความยืดหยุ่นของเจลแป้ง พบว่า การผสมแป้งถั่วหัวช้างในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75 มีผลทำให้ความยืดหยุ่นแตกต่างกันดังนี้ คือ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 การผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 50 และ ร้อยละ 75 แป้งผสมมีความยืดหยุ่นแป้งเพิ่มขึ้น การผสมแป้งถั่วหัวช้างมีผลต่อความยืดหยุ่นของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 และ WF 80 แต่อัตราส่วนที่เพิ่มความยืดหยุ่นมีค่าไม่แตกต่าง ในขณะที่การผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 25 และร้อยละ 75 ไม่มีผลต่อความยืดหยุ่นของแป้งผสมที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 ความยืดหยุ่นของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 4 ระดับ ไม่มีความแตกต่างกันในทุกอัตราส่วนที่มีการผสมแป้งถั่วหัวช้าง

เมื่อพิจารณาผลของแป้งที่มีต่อค่า Cohesiveness หรือ ค่าความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ของเจลแป้ง พบว่า การผสมแป้งถั่วหัวช้างในอัตราส่วนร้อยละ 75 มีผลทำให้ความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ของเจลแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 เพิ่มขึ้น ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 มีความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ของเจลแป้งลดลง เมื่อมีการผสมแป้งถั่วหัวช้างที่ร้อยละ 50 การผสมแป้งถั่วหัวช้างไม่มีผลต่อความสามารถในการเกาะรวมกันได้ของเจลแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อผสมแป้งถั่วหัวช้าง แต่เมื่อผสมแป้งถั่วหัวช้างร้อยละ 25 ความสามารถในการเกาะรวมตัวกันของเจลแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF

50 มีค่าต่ำสุด การผสมแป้งหัวช้างเป็นร้อยละ 50 สามารถแบ่งคุณสมบัติการเกาะรวมตัวกันของเจลแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่ามากได้แก่ แป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 70 และ WF 80 กลุ่มที่มีค่าน้อย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 50 และ WF 60

เมื่อพิจารณาค่า Gumminess หรือค่าความยากง่ายในการเคี้ยว พบว่า ค่าความยากง่ายในการเคี้ยวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 70 และ WF 80 มีค่าเพิ่มขึ้นตามการผสมของแป้งหัวช้าง แป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 60 มีค่าความยากง่ายในการเคี้ยวเพิ่มขึ้นจาก 84 เป็น 144, 123 และ 103 เมื่อมีการผสมแป้งหัวช้าง ที่มีอัตราส่วนร้อยละ 75, 25 และ 50 ตามลำดับ ในขณะที่การผสมของแป้งหัวช้างในอัตราส่วนร้อยละ 75 จึงจะเพิ่มความยากง่ายในการเคี้ยวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 50 ได้ ค่าความยากง่ายในการเคี้ยวที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งพบในการผสมแป้งหัวช้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75 ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 60, WF 70 และ WF 80 ตามลำดับ

ตารางที่ 20 สมบัติเนื้อสัมผัสของเจลแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดและ แป้งผสมกับแป้งถั่วหัวช้างที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer^{1,2,3}

สมบัติเนื้อสัมผัส	แป้งมันสำปะหลัง	อัตราส่วนของแป้งถั่วหัวช้าง (ร้อยละ)			
		0	25	50	75
ความแข็ง (Hardness)	ดิบ	15 ± 1 ^{c,D}	23 ± 2 ^{c,D}	46 ± 3 ^{b,C}	103 ± 9 ^{a,C}
	WF 50	152 ± 2 ^{a,A}	101 ± 1 ^{c,B}	92 ± 1 ^{d,B}	144 ± 1 ^{b,B}
	WF 60	97 ± 4 ^{d,B}	140 ± 7 ^{b,A}	128 ± 0 ^{c,A}	161 ± 1 ^{a,B}
	WF 70	26 ± 3 ^{c,C}	93 ± 5 ^{b,B}	132 ± 7 ^{a,A}	149 ± 12 ^{a,B}
	WF 80	8 ± 0 ^{d,E}	66 ± 1 ^{c,C}	133 ± 1 ^{b,A}	206 ± 4 ^{a,A}
ความยืดหยุ่น (Springiness)	ดิบ	0.74 ± 0.04 ^{c,B}	0.88 ± 0.04 ^{b,A}	0.94 ± 0.01 ^{ab,AB}	0.97 ± 0.02 ^{a,A}
	WF 50	0.94 ± 0.01 ^{ab,A}	0.89 ± 0.01 ^{c,A}	0.92 ± 0.01 ^{bc,B}	0.95 ± 0.00 ^{a,A}
	WF 60	0.94 ± 0.00 ^{a,A}	0.96 ± 0.00 ^{a,A}	0.94 ± 0.01 ^{a,AB}	0.96 ± 0.02 ^{a,A}
	WF 70	0.74 ± 0.01 ^{b,B}	0.91 ± 0.07 ^{a,A}	0.95 ± 0.03 ^{a,AB}	0.97 ± 0.02 ^{a,A}
	WF 80	0.24 ± 0.04 ^{b,C}	0.93 ± 0.02 ^{a,A}	0.98 ± 0.00 ^{a,A}	0.96 ± 0.00 ^{a,A}
ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness)	ดิบ	0.85 ± 0.09 ^{a,A}	0.88 ± 0.01 ^{a,A}	0.90 ± 0.02 ^{a,A}	0.93 ± 0.02 ^{a,AB}
	WF 50	0.82 ± 0.00 ^{b,A}	0.69 ± 0.02 ^{c,B}	0.78 ± 0.01 ^{b,B}	0.90 ± 0.01 ^{a,BC}
	WF 60	0.87 ± 0.00 ^{a,A}	0.88 ± 0.00 ^{a,A}	0.81 ± 0.04 ^{b,B}	0.89 ± 0.00 ^{a,C}
	WF 70	0.73 ± 0.13 ^{a,A}	0.89 ± 0.00 ^{a,A}	0.90 ± 0.01 ^{a,A}	0.91 ± 0.01 ^{a,ABC}
	WF 80	0.24 ± 0.03 ^{b,B}	0.89 ± 0.01 ^{a,A}	0.92 ± 0.00 ^{a,A}	0.93 ± 0.00 ^{a,A}
ความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess)	ดิบ	12 ± 2 ^{c,C}	20 ± 2 ^{c,E}	41 ± 2 ^{b,D}	95 ± 10 ^{a,C}
	WF 50	125 ± 1 ^{b,A}	70 ± 2 ^{c,C}	72 ± 0 ^{c,C}	130 ± 0 ^{a,B}
	WF 60	84 ± 3 ^{d,B}	123 ± 6 ^{b,A}	103 ± 5 ^{c,B}	144 ± 1 ^{a,B}
	WF 70	19 ± 6 ^{c,C}	83 ± 5 ^{b,B}	118 ± 8 ^{a,A}	135 ± 13 ^{a,B}
	WF 80	2 ± 1 ^{d,D}	59 ± 1 ^{b,A}	123 ± 2 ^{b,A}	192 ± 3 ^{a,A}

หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

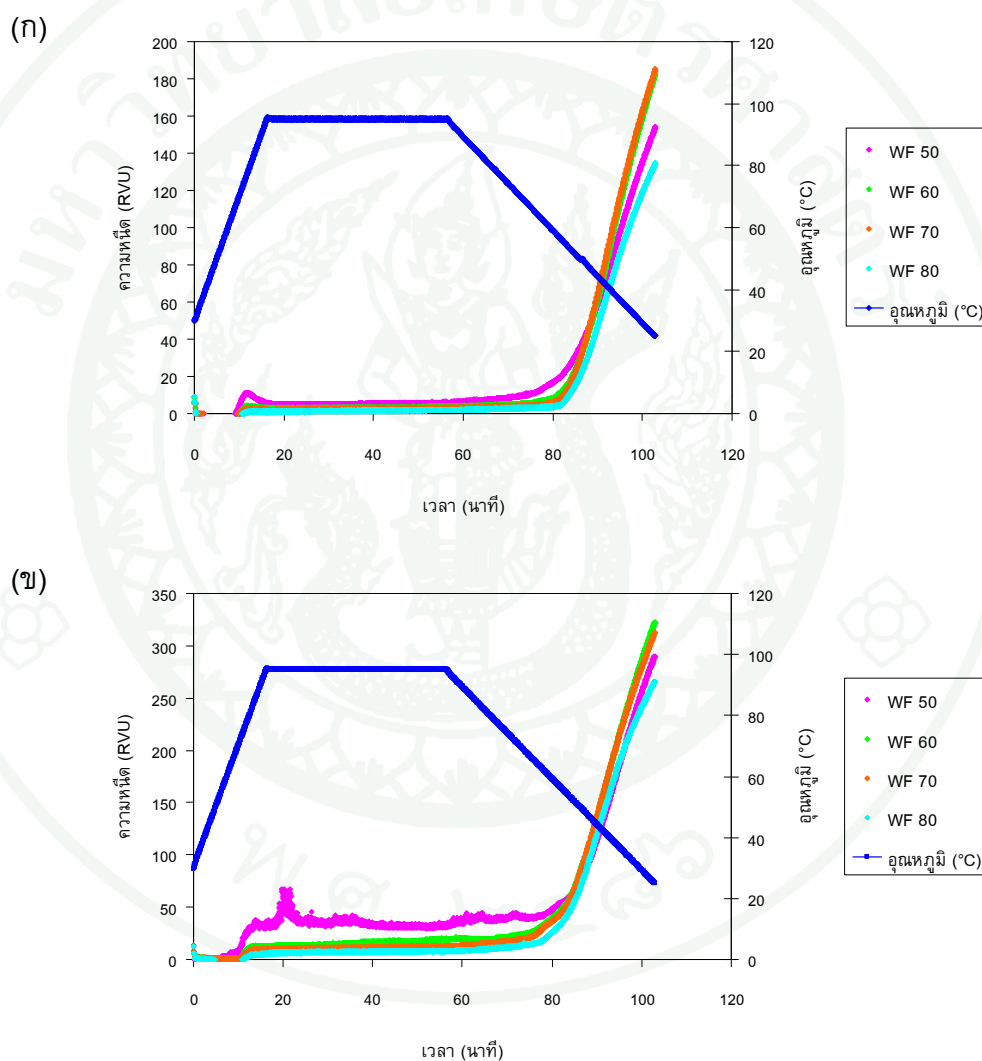
² WF 50 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 50
WF 60 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 60
WF 70 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 70
WF 80 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 80

³ สมบัติเนื้อสัมผัสของแป้งถั่วหัวช้างมีค่าดังนี้ Hardness=217±3,

Springiness=0.96±0.00, Cohesiveness=0.94±0.00, Gumminess=203±3

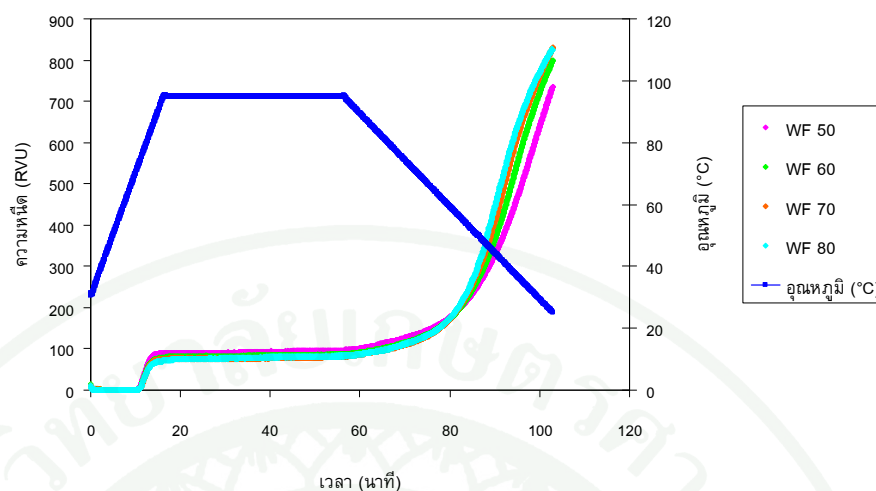
3.2 ผลของแป้งข้าวต่อสมบัติรีโอโลยีของแป้งมันสำปะหลัง

เมื่อนำแป้งข้าวมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 4 ระดับ ตามค่าการไหล เทียบกับน้ำ คือ 50, 60, 70 และ 80 ตามลำดับ ในอัตราส่วน ร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นรวมของแป้งผสมทั้งหมด ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ได้แป้งผสมซึ่งผ่านการวิเคราะห์ พฤติกรรมความหนืดด้วยเครื่อง RVA แสดงดังภาพที่ 48

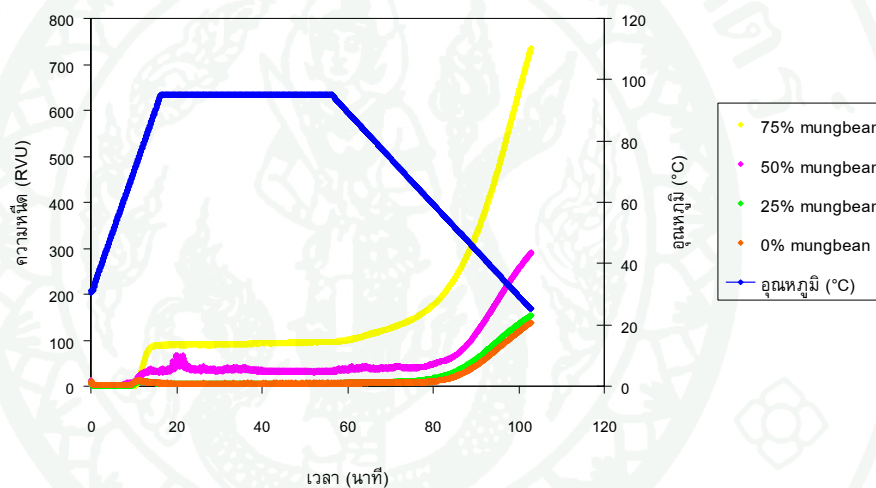


ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสม กับแป้งข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแป้งข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ (ง) ด้วย เครื่อง RVA

(ค)



(ง)

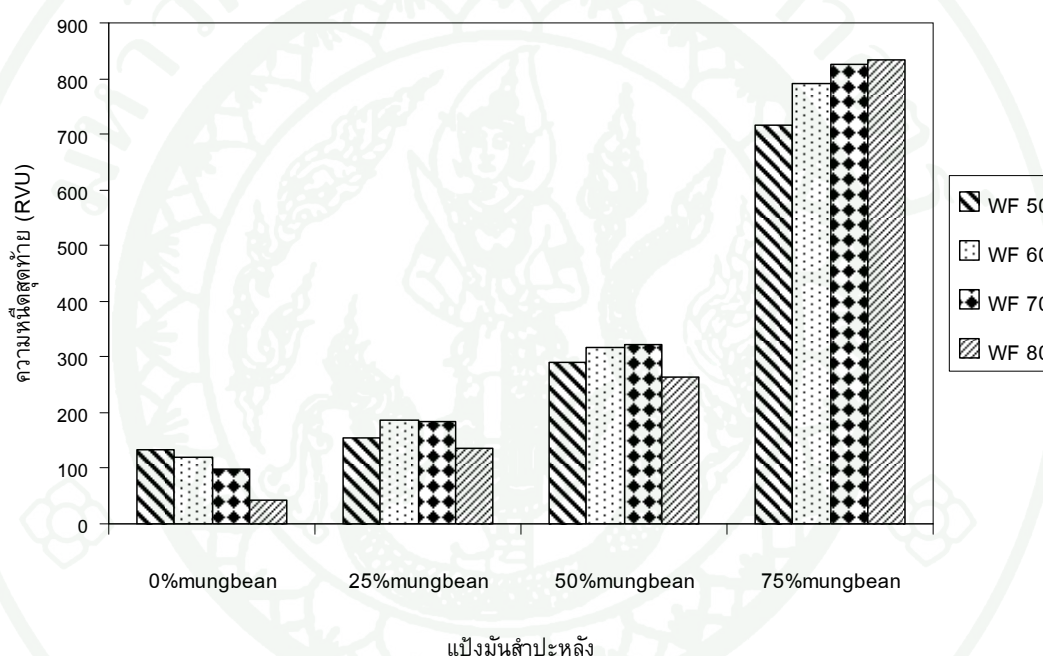


ภาพที่ 48 (ต่อ)

จากภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งผสมขณะให้ความร้อนมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า ความหนืดมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้งดัดแปร (ภาพที่ 48 (ก), (ข), (ค)) หากพิจารณาถึงผลของการเติมแป้งถั่วเขียว พบว่า เมื่อแป้งถั่วเขียวมีปริมาณเพิ่มขึ้นความหนืดของแป้งผสมที่ค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันในแป้งผสมทั้ง 4 ระดับ (ภาพที่ 48 (ง))

จากการวิเคราะห์ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 4 ระดับผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ (ภาพที่ 48, 49 และ ตารางที่ 21) พบว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นเมื่อเติมแป้งถั่วเขียว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มี

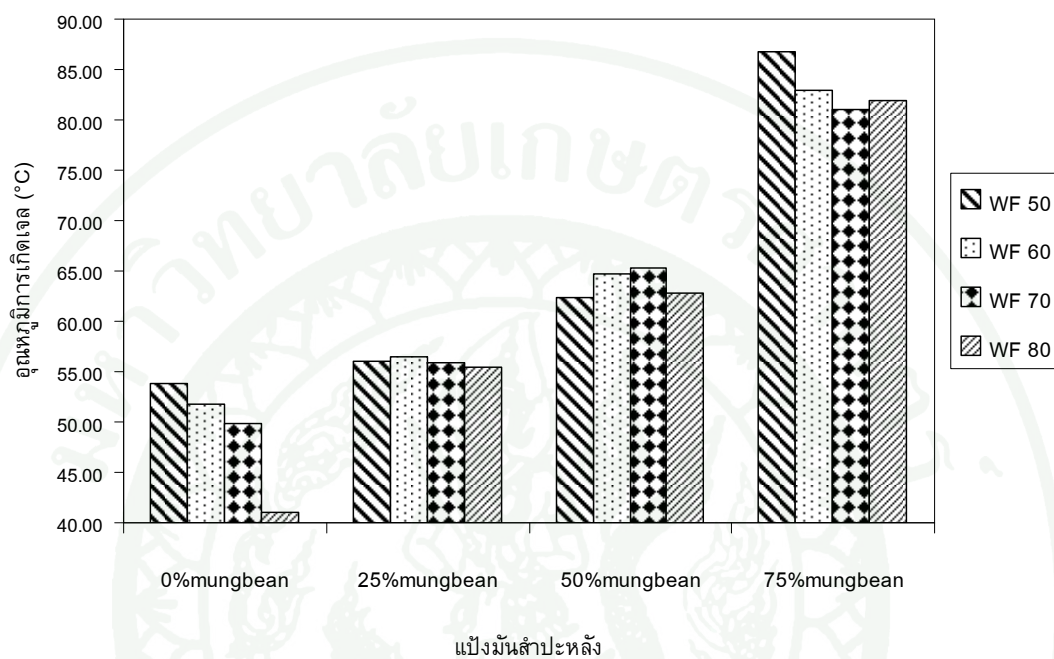
ความหนืดสุดท้ายสูง ได้แก่ การผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 75 และกลุ่มที่มีความหนืดสุดท้ายต่ำ ได้แก่ การผสมแป้งถั่วเขียว ร้อยละ 25 และ 50 การผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25, 50 และ 75 กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรระดับต่างๆ มีผลทำให้ความหนืดสุดท้ายแตกต่างกันไปดังนี้คือ เมื่อผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25 และ 50 ความหนืดสุดท้ายมีค่าเหมือนกัน โดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 และ WF 70 มีค่าความหนืดสุดท้ายมีค่าสูงสุด รองลงคือ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 และความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่การผสมแป้งถั่วเขียวเป็นร้อยละ 75 พบว่า ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 และ 80 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 และ WF 50



ภาพที่ 49 ความหนืดสุดท้ายของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากการศึกษาอุณหภูมิในการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 4 ระดับผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ (ภาพที่ 50 และ ตารางที่ 21) พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลของแป้งผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ ในทุกตัวอย่างแป้งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการผสมแป้งถั่วเขียวที่ระดับร้อยละ 25 อุณหภูมิในการเกิดเจลไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การผสมแป้งถั่วเขียวที่ระดับร้อยละ 50 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 70 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงสุดและการผสมแป้งถั่วเขียวที่ระดับร้อยละ 75 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงสุด จากการคำนวณร้อยละอุณหภูมิในการเกิดเจลที่

เปลี่ยนไปโดยแป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 80 มีอุณหภูมิเปลี่ยนไปมากที่สุด คือ ร้อยละ 99.32 ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังตัดแปร WF 50 และ WF 60 มีอุณหภูมิเปลี่ยนไปร้อยละ 60.23 และ 62.53 ตามลำดับ



ภาพที่ 50 อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 21 สมบัติความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดและ แป้งผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ^{1,2,3}

แป้งมันสำปะหลัง	ความหนืดสุดท้าย (RVU)			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วเขียว(ร้อยละ)			
	0	25	50	75
WF 50	133 ± 7 ^{d,A}	155 ± 1 ^{c,B}	291 ± 1 ^{b,B}	715 ± 29 ^{a,C}
WF 60	121 ± 0 ^{d,B}	187 ± 6 ^{c,A}	317 ± 7 ^{b,A}	790 ± 13 ^{a,B}
WF 70	99 ± 3 ^{d,C}	183 ± 3 ^{c,A}	322 ± 13 ^{a,A}	825 ± 6 ^{a,A}
WF 80	41 ± 0 ^{d,D}	136 ± 1 ^{c,C}	264 ± 3 ^{b,C}	835 ± 9 ^{a,A}
แป้งมันสำปะหลัง	อุณหภูมิการเกิดเจล (องศาเซลเซียส)			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วเขียว (ร้อยละ)			
	0	25	50	75
WF 50	53.88 ± 0.51 ^{dA}	55.99 ± 0.09 ^{cAB}	62.29 ± 0.79 ^{bB}	86.83 ± 0.03 ^{aA}
WF 60	51.80 ± 0.01 ^{dAB}	56.53 ± 0.31 ^{cA}	64.75 ± 0.29 ^{bA}	83.00 ± 0.65 ^{aB}
WF 70	49.83 ± 0.23 ^{dB}	55.88 ± 0.32 ^{cAB}	65.34 ± 0.11 ^{bB}	80.99 ± 0.79 ^{aB}
WF 80	41.08 ± 0.31 ^{dC}	55.39 ± 0.20 ^{cB}	62.86 ± 0.09 ^{bB}	81.88 ± 1.49 ^{aB}

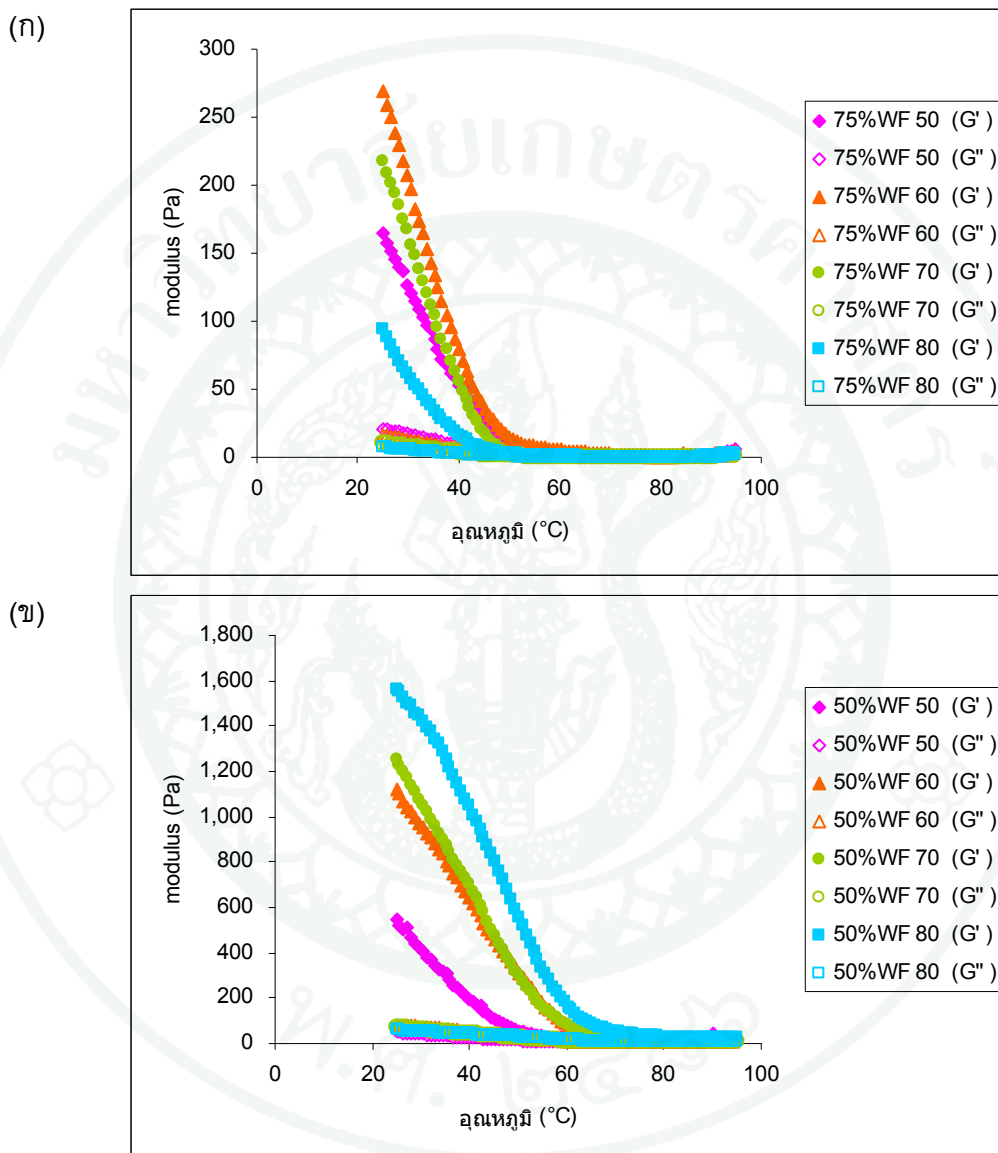
หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² WF 50 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 50
WF 60 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 60
WF 70 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 70
WF 80 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 80

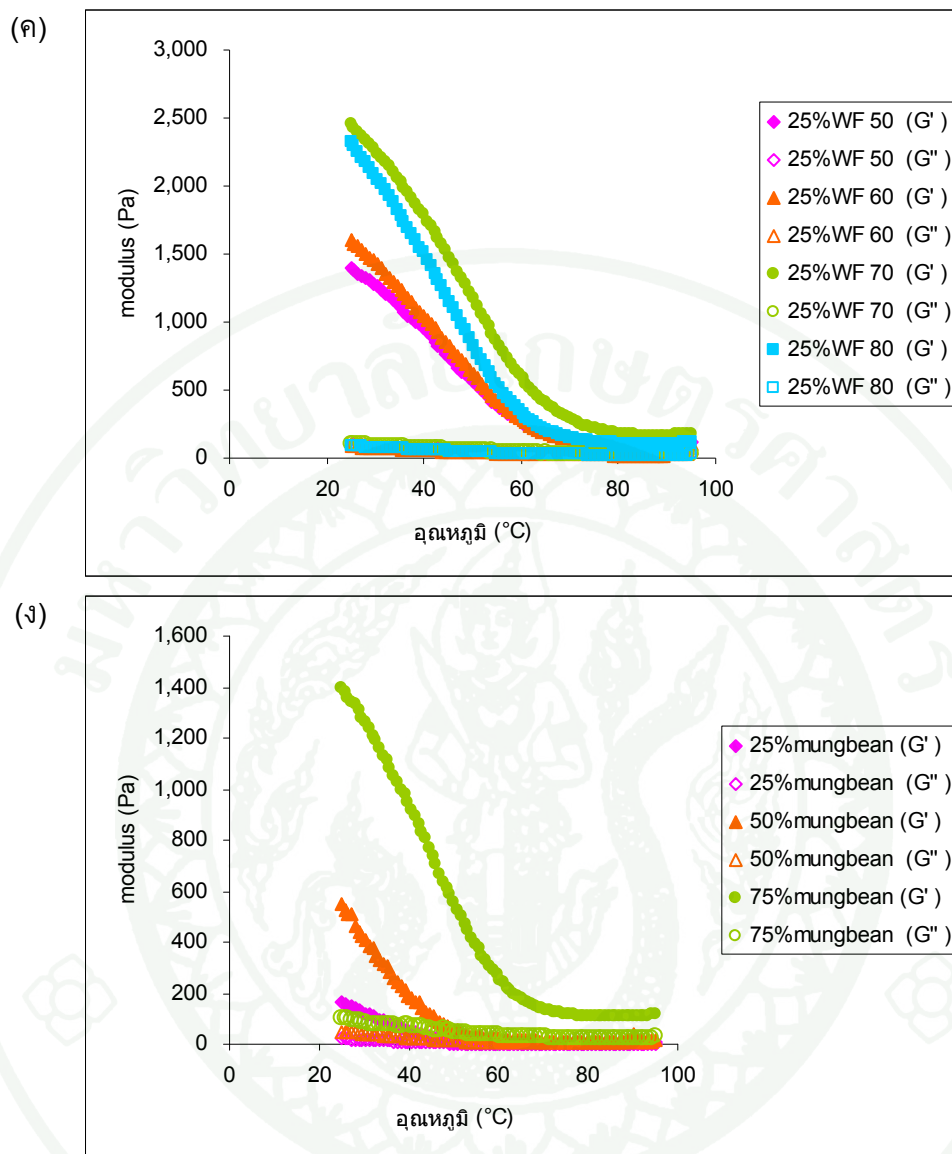
³ ความหนืดสุดท้ายของแป้งถั่วเขียวเท่ากับ 589±99 RVU

อุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลของแป้งถั่วเขียวเท่ากับ 93.91±0.09 องศาเซลเซียส

สมบัติวิฤภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลังดิบ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร 4 ระดับ และแป้งมันสำปะหลังผสมแป้งถั่วเขียวที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักขณะทำให้เย็นที่ 25 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 51, 52 และ ตารางที่ 22



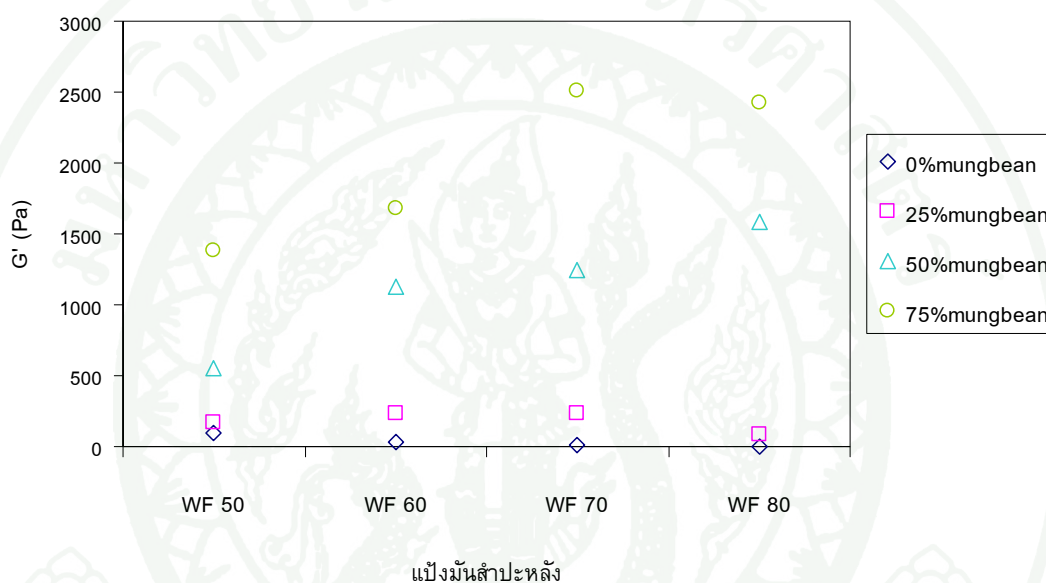
ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสม กับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 (ก), ร้อยละ 50:50 (ข), ร้อยละ 25:75 (ค) และแป้งดัดแปรด้วยกรด (WF 50) ผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ (ง)



ภาพที่ 51 (ต่อ)

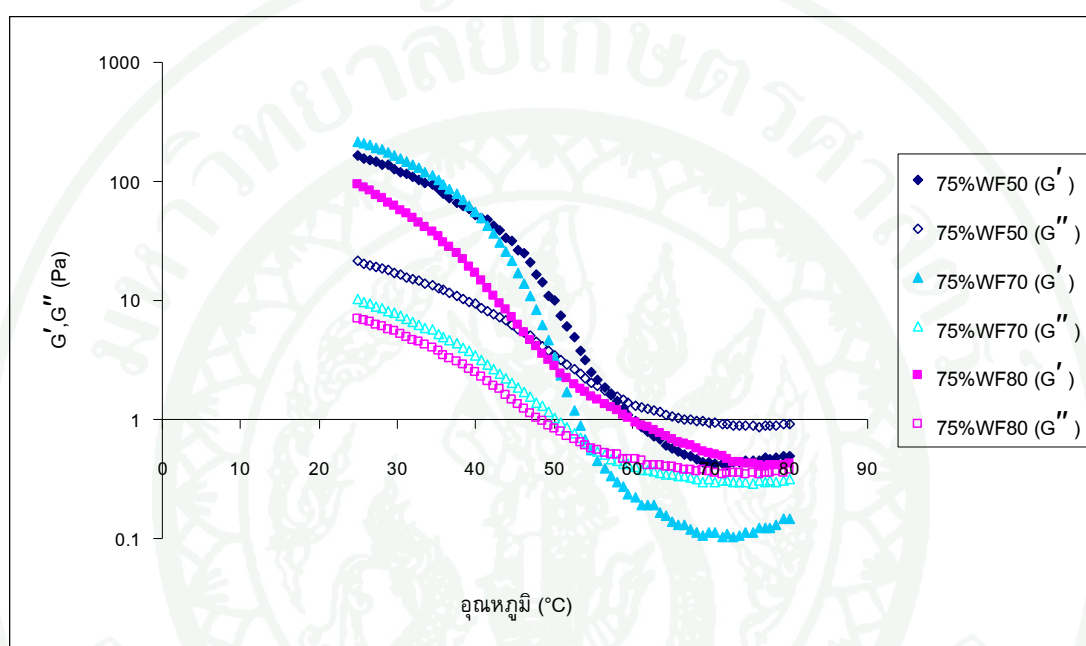
จากการศึกษา พบว่า การผสมแป้งถั่วเขียวทำให้ค่า G' เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกัน แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 ซึ่งมีค่า G' ต่ำสุด การผสมแป้งถั่วเขียวทำให้แป้งผสมมีค่า G' เพิ่มขึ้น โดยมีค่า 87, 1,586 และ 2,430 Pa เมื่อผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25, 50 และ 75 ตามลำดับ การผสมแป้งถั่วเขียวที่ร้อยละ 25 พบว่า แป้งผสมของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่า G' ต่ำที่สุด แต่มีค่า G' สูงสุด เมื่อมีการผสมแป้งถั่วเขียวที่ร้อยละ 50 และมีค่า G' ไม่แตกต่างกับแป้งมันสำปะหลัง WF 70 เมื่อมีการผสมแป้งถั่วเขียวที่ร้อยละ 75 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของระดับการดัดแปรแป้งด้วยกรดมีผลต่อค่า G' ที่อัตราส่วน

ต่างๆ กัน สำหรับ Loss factor (damping factor) หรือ $\tan \delta$ เป็นอัตราส่วนของค่า storage modulus (G') กับค่า loss modulus (G'') ซึ่งบอกลักษณะของเจลได้โดย $\tan \delta$ มีค่ามากเจลจะนิ่ม ถ้า $\tan \delta$ มีค่าน้อยเจลจะแข็ง จากตารางที่ 22 พบว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60, WF 70 และ WF 80 มีค่า $\tan \delta$ น้อย ($\tan \delta < 0.1$) เมื่อมีการผสมแป้งข้าวตังแต่ร้อยละ 25 เป็นต้นไป ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 การผสมแป้งข้าวตังทำให้ค่า $\tan \delta$ น้อยที่ร้อยละ 75



ภาพที่ 52 Storage modulus (G') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยการผสมกับแป้งข้าวตังที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อมีการลดอุณหภูมิลงจาก 95 องศาเซลเซียส ถึง 25 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 53) G' และ G'' มีค่าเพิ่มขึ้น และจุดที่ G' และ G'' มาไขว้กัน กล่าวคือ จุดที่ค่า G' และ G'' เท่ากัน ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดที่เกิดเจล (gelling point) (Rao, 1999) การผสมแป้งข้าวรีดร้อยละ 25 กับ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50, WF 70 และ WF 80 สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิ 58, 54 และ 85 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพที่ 53 Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ผสมกับแป้งข้าวรีดที่อัตราส่วนร้อยละ 25 ขณะทำให้เย็น

ตารางที่ 22 สมบัติวัฏภาคการไหลของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด และแป้งผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ^{1,2,3}

แป้งมันสำปะหลัง	Storage modulus (G')(Pa)			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วเขียว(ร้อยละ)			
	0	25	50	75
ดิบ	65 ± 1 ^{a,B}	134 ± 1 ^{c,BC}	337 ± 2 ^{a,E}	1200 ± 74 ^{a,C}
WF 50	97 ± 6 ^{d,A}	169 ± 6 ^{c,AB}	549 ± 3 ^{b,D}	1382 ± 30 ^{a,C}
WF 60	31 ± 1 ^{d,C}	232 ± 52 ^{a,A}	1123 ± 1 ^{b,C}	1684 ± 109 ^{a,B}
WF 70	9 ± 1 ^{a,D}	233 ± 21 ^{a,A}	1249 ± 8 ^{b,B}	2506 ± 61 ^{a,A}
WF 80	5 ± 1 ^{a,D}	87 ± 8 ^{c,C}	1586 ± 33 ^{b,A}	2430 ± 151 ^{a,A}

แป้งมันสำปะหลัง	tan δ			
	อัตราส่วนของแป้งถั่วเขียว(ร้อยละ)			
	0	25	50	75
ดิบ	0.31 ± 0.01 ^{a,A}	0.23 ± 0.01 ^{b,A}	0.15 ± 0.00 ^{c,A}	0.08 ± 0.01 ^{d,A}
WF 50	0.14 ± 0.00 ^{a,C}	0.13 ± 0.00 ^{a,B}	0.10 ± 0.01 ^{b,B}	0.08 ± 0.01 ^{c,A}
WF 60	0.12 ± 0.01 ^{a,C}	0.07 ± 0.01 ^{ba,C}	0.08 ± 0.01 ^{b,C}	0.05 ± 0.00 ^{c,B}
WF 70	0.23 ± 0.04 ^{a,B}	0.06 ± 0.01 ^{b,C}	0.06 ± 0.00 ^{b,D}	0.05 ± 0.01 ^{b,B}
WF 80	0.12 ± 0.01 ^{a,C}	0.07 ± 0.01 ^{b,C}	0.04 ± 0.00 ^{c,E}	0.04 ± 0.00 ^{c,B}

หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² WF 50 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 50
WF 60 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 60
WF 70 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 70
WF 80 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 80

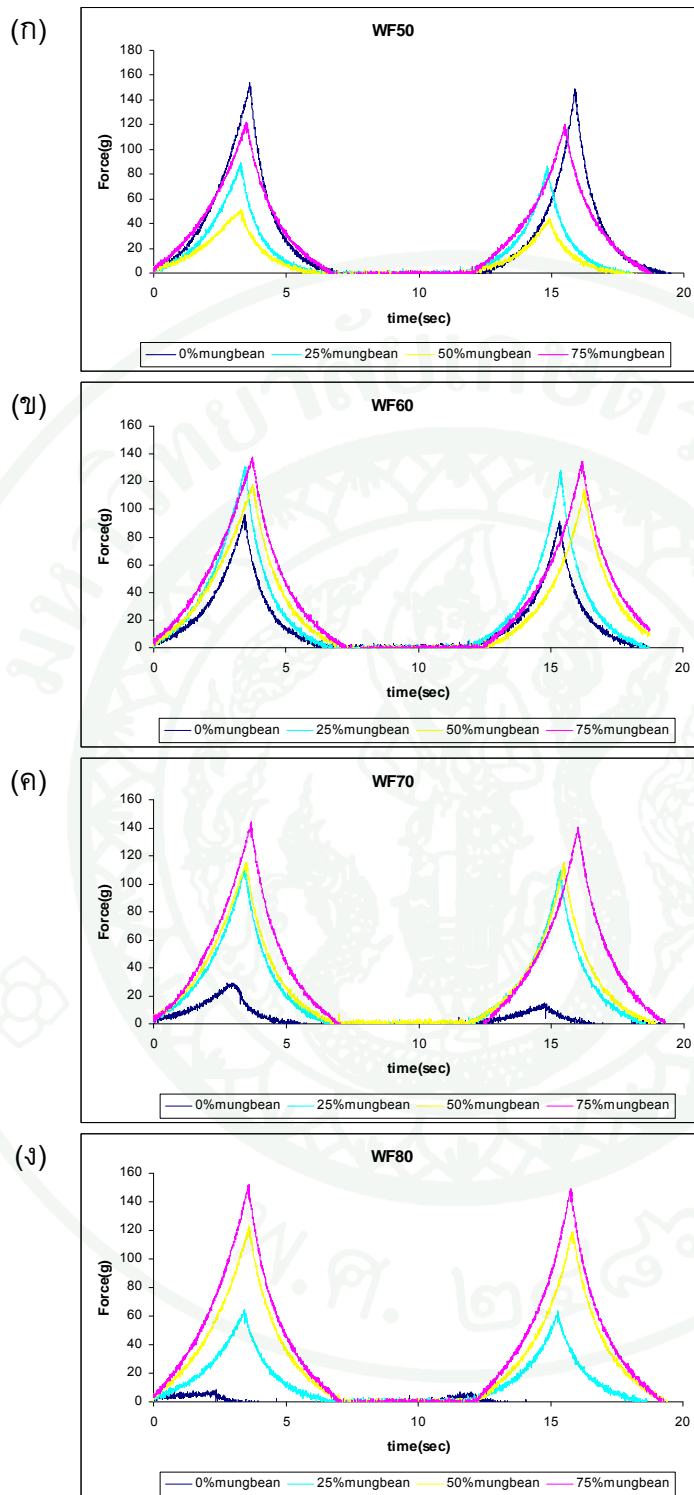
³ Storage modulus (G') ของแป้งถั่วเขียวเท่ากับ 2335±72 Pa

tan δ ของแป้งถั่วหัวช้างเท่ากับ 0.04±0.00

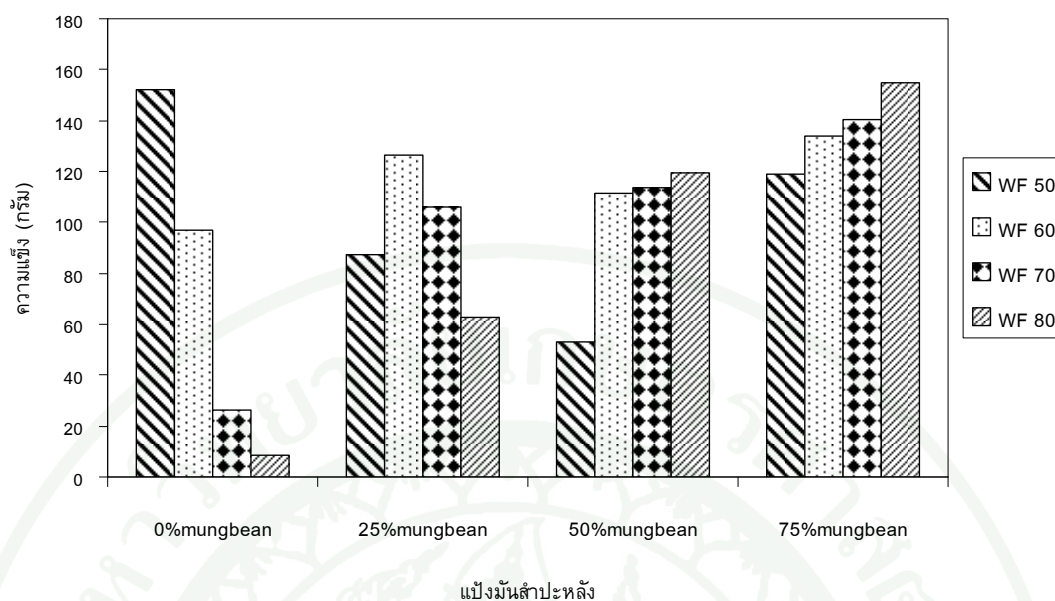
ทั้งนี้วิธีการวัดค่าความหนืดสุดท้ายโดยเครื่อง RVA และคุณสมบัติวัฏภาคการไหล เป็นการวัดในลักษณะของของไหล และ viscoelasticity ของตัวอย่างตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ยังคงวิเคราะห์สมบัติที่เป็นของแข็งโดยทำการตรวจวัดลักษณะเนื้อสัมผัสซึ่งจะช่วยบ่งบอกได้ว่า เจลมีคุณภาพเป็นอย่างไร เช่น แข็งแต่มีความยืดหยุ่น หรือ แข็งแต่แตกเปราะ โดยใช้การวัดค่าแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ซึ่งใช้อธิบายถึงพฤติกรรมของเจลแบ่งได้ เมื่อพิจารณาสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความยืดหยุ่น (Springiness) ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess) ของเจลแบ่งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 54, 55 และ ตารางที่ 23 เมื่อพิจารณาผลของแป้งถั่วเขียวต่อค่า Hardness หรือความแข็งของเจลแบ่ง พบว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 ที่ไม่ผสมถั่วเขียวมีความแข็งมากที่สุด (152 กรัม) โดยมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับแป้งถั่วเขียว (154 กรัม) แสดงให้เห็นว่า การดัดแปรแป้งด้วยกรดทำให้แป้งมันสำปะหลังเกิดเจลที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับแป้งถั่วเขียว อย่างไรก็ตามเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติหลายประการร่วมกัน เช่น ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเหนียว ความหนืด เป็นต้น ซึ่งควรที่จะมีการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธีประสาทสัมผัสร่วมด้วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ในขณะที่การผสมแป้งถั่วเขียวในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50 และ 75 มีผลทำให้ความแข็งของแป้งทุกชนิดเพิ่มขึ้น ยกเว้นแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 ขณะที่การผสมแป้งถั่วเขียวไม่ได้เพิ่มความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 เมื่อผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25 ทำให้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 มีค่าความแข็งมากที่สุด การผสมแป้งถั่วเขียวที่ร้อยละ 50 และ 75 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60, WF 70 และ WF 80 ไม่มีความแตกต่างกันของความแข็งของเจล

เมื่อพิจารณาผลของแป้งที่มีต่อค่า Springiness หรือความยืดหยุ่นของเจลแบ่ง พบว่า ความยืดหยุ่นของแป้งผสมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมแป้งถั่วเขียว ยกเว้นแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 ในขณะที่การผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 50 ทำให้ความยืดหยุ่นของแป้งผสมลดลง แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60, WF 70 และ WF 80 ระดับการผสมของแป้งถั่วเขียวที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความยืดหยุ่นของแป้งผสม การผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25 และ 50 แป้งผสมมีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 ขณะที่แป้งชนิดอื่นมีความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกัน แป้งผสมมีความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกันสำหรับการผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 75



ภาพที่ 54 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเจลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด WF 50 (ก), WF 60 (ข), WF 70 (ค), WF 80 (ง) ผสมกับแป้งข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 55 ความแข็งของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลของแป้งที่มีต่อค่า Cohesiveness หรือ ค่าความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ของเจลแป้ง พบว่า มันสำปะหลังดัดแปร WF 70 มีความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้มากที่สุดเมื่อผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 75 แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่การผสมของแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25 และไม่เปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มแป้งถั่วเขียวในอัตราส่วนที่มากขึ้น การเพิ่มแป้งถั่วเขียวไม่มีผลต่อความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ในแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 และ WF 60 การผสมแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25 และ 50 ทำให้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 มีค่าต่ำสุด ความสามารถในการเกาะรวมตัวกันได้ของแป้งผสมด้วยแป้งถั่วเขียวร้อยละ 75 ไม่มีความแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของแป้งที่มีต่อค่า Gumminess หรือค่าความยากง่ายในการเคี้ยว พบว่า การผสมแป้งถั่วเขียวทำให้ค่าความยากง่ายในการเคี้ยวของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ยกเว้น แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 ซึ่งมีค่ามากที่สุดก่อนจะมีการผสมแป้งถั่วเขียว การเพิ่มแป้งถั่วเขียวร้อยละ 25 ค่าความยากง่ายในการเคี้ยวของแป้งผสมแป้งได้ 2 กลุ่ม คือ มีค่ามาก ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 60 และ WF 70 มีค่าน้อย ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 และ WF 80 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งผสมแต่ละชนิด แป้งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80, WF 70, WF 60 และ WF 50 มีค่าความยากง่ายในการเคี้ยวแตกต่างกันจากมากไปน้อย ในการผสมของแป้งถั่วเขียวร้อยละ 50 และ 75

ตารางที่ 23 สมบัติเนื้อสัมผัสของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรดและแป้งผสมกับแป้งถั่วเขียวที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer^{1,2,3}

สมบัติเนื้อสัมผัส	แป้งมันสำปะหลัง	อัตราส่วนของแป้งถั่วเขียว (ร้อยละ)			
		0	25	50	75
ความแข็ง (Hardness)	ดิบ	15 ± 1 ^{b,D}	22 ± 1 ^{c,E}	39 ± 2 ^{b,C}	77 ± 7 ^{a,D}
	WF 50	152 ± 2 ^{a,A}	87 ± 6 ^{c,C}	53 ± 3 ^{a,B}	119 ± 3 ^{b,C}
	WF 60	97 ± 4 ^{b,B}	126 ± 7 ^{a,A}	111 ± 4 ^{ab,A}	134 ± 14 ^{a,BC}
	WF 70	26 ± 3 ^{c,C}	106 ± 10 ^{b,B}	114 ± 0 ^{b,A}	141 ± 0 ^{a,AB}
	WF 80	8 ± 0 ^{d,E}	63 ± 1 ^{c,D}	120 ± 7 ^{b,A}	155 ± 9 ^{a,A}
ความยืดหยุ่น (Springiness)	ดิบ	0.74 ± 0.04 ^{bB}	0.92 ± 0.00 ^{aAB}	0.97 ± 0.00 ^{aA}	0.97 ± 0.00 ^{dD}
	WF 50	0.94 ± 0.01 ^{abA}	0.89 ± 0.02 ^{bcB}	0.86 ± 0.03 ^{cB}	0.97 ± 0.02 ^{aA}
	WF 60	0.94 ± 0.00 ^{aA}	0.96 ± 0.02 ^{aA}	0.96 ± 0.00 ^{aA}	0.97 ± 0.01 ^{aA}
	WF 70	0.74 ± 0.01 ^{bB}	0.95 ± 0.01 ^{aA}	0.96 ± 0.03 ^{aA}	0.96 ± 0.00 ^{aA}
	WF 80	0.24 ± 0.04 ^{bC}	0.94 ± 0.01 ^{aA}	0.98 ± 0.01 ^{aA}	0.98 ± 0.01 ^{aA}
ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness)	ดิบ	0.85 ± 0.09 ^{aA}	0.88 ± 0.01 ^{aAB}	0.90 ± 0.01 ^{aAB}	0.93 ± 0.00 ^{aA}
	WF 50	0.82 ± 0.00 ^{aA}	0.79 ± 0.06 ^{aB}	0.80 ± 0.10 ^{aB}	0.92 ± 0.00 ^{aB}
	WF 60	0.87 ± 0.00 ^{aA}	0.84 ± 0.06 ^{aAB}	0.88 ± 0.00 ^{aAB}	0.92 ± 0.01 ^{aB}
	WF 70	0.73 ± 0.13 ^{bA}	0.89 ± 0.00 ^{abA}	0.88 ± 0.01 ^{abAB}	0.92 ± 0.00 ^{aAB}
	WF 80	0.24 ± 0.03 ^{bB}	0.90 ± 0.01 ^{aA}	0.93 ± 0.00 ^{aA}	0.93 ± 0.00 ^{aA}
ความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess)	ดิบ	12 ± 2 ^{c,C}	19 ± 1 ^{c,C}	35 ± 2 ^{b,C}	72 ± 7 ^{a,D}
	WF 50	125 ± 1 ^{a,D}	69 ± 0 ^{c,B}	43 ± 7 ^{d,C}	109 ± 2 ^{b,C}
	WF 60	84 ± 3 ^{b,B}	106 ± 13 ^{ab,A}	98 ± 4 ^{ab,B}	123 ± 14 ^{a,BC}
	WF 70	19 ± 6 ^{c,C}	95 ± 9 ^{b,A}	100 ± 2 ^{b,AB}	130 ± 0 ^{a,AB}
	WF 80	2 ± 1 ^{d,A}	56 ± 0 ^{c,B}	111 ± 7 ^{b,A}	144 ± 8 ^{a,A}

หมายเหตุ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² WF 50 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 50
WF 60 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 60
WF 70 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 70
WF 80 คือ แป้งมันสำปะหลังย่อยด้วยกรดที่มีค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) เท่ากับ 80

³ สมบัติเนื้อสัมผัสของแป้งถั่วเขียวมีค่าดังนี้ Hardness=154±7,

Springiness=0.96±0.00, Cohesiveness=0.94±0.00, Gumminess=145±7

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติโครงสร้างและเคมีฟิสิกส์ของแป้งชนิดต่างๆ และการใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงเจลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด สรุปผลได้ดังนี้

1. ในการศึกษาแป้งชนิดต่างๆ ทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ แป้งเผือก แป้งมันแกว แป้งเอนชิต แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง พบว่า รูปร่างของเม็ดแป้งเอนชิต มีรูปร่างเหลี่ยม โดยมีขนาดเม็ดแป้งใหญ่ที่สุด (41.8 ไมโครเมตร) ในขณะที่แป้งชนิดอื่นมีลักษณะกลม รี โดยแป้งเผือกมีขนาดเม็ดแป้งเล็กที่สุด (2.0 ไมโครเมตร) สำหรับรูปแบบ x-ray diffraction pattern สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ โครงสร้างผลึกแบบ A ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก แป้งมันแกว และแป้งกระจับ แบบ B ได้แก่ แป้งเอนชิต และ แบบ C ได้แก่ แป้งถั่วเขียว และแป้งถั่วหัวช้าง ในขณะที่ปริมาณอะมิโลสของแป้งถั่วหัวช้าง แป้งถั่วเขียว แป้งเอนชิต แป้งกระจับ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันแกว และแป้งเผือก มีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 35.59, 28.47, 20.85, 19.20, 17.44, 14.15 และ 7.91 ตามลำดับ ลักษณะการกระจายตัวของสายโซ่อะมิโลเพกทินของแป้งมันสำปะหลัง แป้งเผือก และแป้งมันแกว มีสายโซ่ขนาดสั้นมากที่สุด ในขณะที่สายโซ่ขนาดยาวจะพบมากในแป้งถั่วหัวช้าง

2. เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่า แป้งทั้ง 7 ชนิดมีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งกระจับ แป้งเผือก แป้งถั่วเขียว แป้งมันแกว แป้งมันสำปะหลัง แป้งถั่วหัวช้าง และแป้งเอนชิต เท่ากับ 86.80, 82.35, 77.63, 77.08, 72.28, 71.28 และ 69.80 ตามลำดับค่าความหนืดสูงสุด แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ความหนืดสูง (319-373 RVU) ได้แก่ แป้งถั่วเขียวและแป้งมันสำปะหลัง ความหนืดปานกลาง (222-281 RVU) ได้แก่ แป้งมันแกว แป้งเอนชิต และแป้งกระจับ และความหนืดต่ำ (176-197 RVU) ได้แก่ แป้งเผือกและแป้งถั่วหัวช้าง ค่าการคืนตัวมีค่าเป็นบวก แสดงว่าแป้งชนิดนั้นอาจเกิดเจลดี ซึ่งพบในแป้งถั่วหัวช้าง แป้งถั่วเขียว และแป้งกระจับ การเกิดเจลในเซชันเมื่อศึกษาด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลในเซชันแป้งกระจับมีค่าสูงสุด และแป้งถั่วเขียวมีค่าต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 80.22 และ 58.02 องศาเซลเซียสตามลำดับ และมีพลังงานในการเกิดเจลในเซชันในช่วง 11.63 ถึง 20.92 จูลต่อกรัม สมบัติวัฏภาคการไหล พบว่า ค่า storage modulus (G') เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ แป้งถั่วหัวช้าง แป้งถั่วเขียว แป้งกระจับ แป้งเอนชิต แป้งมันแกว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งเผือก โดยในกระบวนการให้ความร้อนมีค่าต่ำกว่ากระบวนการทำให้เย็น และความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของแป้งดิบ เป็นเวลา 180 นาที ของแป้งเผือกมีค่าสูงสุด (ร้อยละ 35.6) ในขณะที่แป้งเอนชิตมีค่าต่ำสุด (ร้อยละ 2.3)

3. จากการศึกษาการดัดแปรแบ่งด้วยกรด ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 1-6 และเวลาการทำปฏิกิริยา 1-7 ชั่วโมง พบว่า แบ่งดัดแปรมีความหนืดลดลง ค่าการไหลเทียบกับน้ำเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นกรดและเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ความหนืดสุดท้ายแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ตามค่าการไหลเทียบกับน้ำ พบว่า ค่าการไหลเทียบกับน้ำเท่ากับ 65 มีค่าเฉลี่ยความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 491 RVU รองลงมาคือ WF 60, WF 70, WF 75 และ WF 80 โดยมีค่าความหนืดสุดท้ายเฉลี่ย 472, 429, 286 และ 173 RVA ตามลำดับ อุณหภูมิการเกิดเจลของแบ่งดัดแปรที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง มีช่วงแคบ (60.40 ถึง 65.77 องศาเซลเซียส) เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้นจนถึง 7 ชั่วโมง อุณหภูมิการเกิดเจลมีค่ากว้าง (48.03 ถึง 66.46 องศาเซลเซียส) อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบ่งดัดแปรสูงที่สุดและต่ำที่สุด คือ การดัดแปรด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 1 ตามลำดับ โดยมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5220 และ 0.3998 ตามลำดับ นอกจากนี้การวัดสมบัติรีโอโลยีของแบ่งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50, WF 60, WF 70 และ WF 80 พบว่า แบ่งมันสำปะหลังดัดแปร WF 50 มีค่าความหนืดสุดท้าย ค่า G' ที่ 25 องศาเซลเซียส และ ค่าความแข็งแรงของเจลสูงที่สุดในขณะที่ค่า $\tan \delta$ มีค่าต่ำ เมื่อมีการดัดแปรเพิ่มขึ้น พบว่าแบ่งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าความหนืดสุดท้าย ค่า G' และ ค่าความแข็งแรงของเจลต่ำที่สุด แต่มีค่า $\tan \delta$ ไม่แตกต่าง

4. จากการศึกษาผลของแบ่งถั่วหัวช้างและแบ่งถั่วเขียวต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแบ่งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกรด พบว่า แบ่งผสมจะมีความหนืดสุดท้าย ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจล ค่า G' ที่ 25 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแบ่งดัดแปรด้วยกรดที่ไม่ผสม การทำแบ่งผสมทำให้แบ่งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 สามารถเกิดเจลได้ดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับแบ่งที่ไม่ผสม โดยพบว่า เมื่อผสมแบ่งถั่วหัวช้างที่ร้อยละ 75 เจลของแบ่งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าความแข็งแรงของเจลสูงสุด และ เมื่อผสมแบ่งถั่วเขียวที่ร้อยละ 75 เจลของแบ่งมันสำปะหลังดัดแปร WF 80 มีค่าความแข็งแรงของเจลสูงสุด ในกรณีแบ่งถั่วหัวช้างการผสมที่ร้อยละ 50 และ 75 ทำให้ระดับการดัดแปรแบ่งด้วยกรดมีอิทธิพลต่อค่า G' น้อย แต่ในกรณีแบ่งถั่วเขียว พบว่า ระดับการดัดแปรแบ่งด้วยกรดยังคงมีอิทธิพลต่อ G' ของแบ่งผสมในทุกอัตราส่วน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. บทที่ 9 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์
มันสำปะหลัง, น. 1-14. ใน เอกสารประกอบการฝึกอบรมโครงการพัฒนาศักยภาพ
การผลิตและการตลาดมันสำปะหลัง 4-8 ส.ค. 2546. มูลนิธิสถาบันพัฒนา
มันสำปะหลังแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ
สยามบรมราชกุมารี ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ
ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร, กรุงเทพฯ.

เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์. 2546. บทที่ 1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลัง, น. 1-33. ใน
เอกสารประกอบการฝึกอบรมโครงการพัฒนาศักยภาพการผลิตและการตลาดมัน
สำปะหลัง 4-8 ส.ค. 2546. มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทยในพระ
ราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ภาควิชาพืชไร่นา คณะ
เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร,
กรุงเทพฯ.

บุญมา นิยมวิทย์. 2550. กระจับพืชโบราณอาหารพื้นบ้าน. อาหาร. 37 (3): 315-317.

วิทย์ เทียงบุญธรรม. 2546. พจนานุกรมสัตว์และพืชในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 3
อักษรพิทยา, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2544. ทรัพยากรพืชในภูมิภาค
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 9: พืชที่ให้คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เมล็ด. พิมพ์ครั้งที่ 1
สหมิตรพรินติ้ง, นนทบุรี.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แปรรูปสำหรับ
อุตสาหกรรมอาหาร. มอก. 1073-2535.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 1990. Official Methods of Analysis.
15th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.

Agugo, U. A. and I. A. Onimawo. 2009. Heat treatment on the nutrituinal value of mungbean. **EJEAFChe**. 8(10): 924-930.

Atichokudomchai, N., S. Shubsngob and S. Varavinit. 2000. Morphological properties of acid-modified tapioca starch. **Starch/stärke**. 52: 283-289.

Atichokudomchai, N. and S. Varavinit. 2003. Characterization and utilization of acid-modified cross-linked tapioca starch in pharmaceutical tablets. **Carbohydrate Polymer**. 53: 263-270.

Bertoft, E. 2004. On the nature of categories of chains in amylopectin and their connection the super helix model. **Carbohydrate polymer**. 57: 211-224.

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

Beta, T. and H. Corke. 2001. Noodle quality as related to sorghum starch properties. **Cereal Chemistry**. 78(4): 417-420.

Biliaderis, C. G., D. G. Grant and J. R. Vose. 1981. Structural characterization of legume starches. II. Study on acid-treated starches. **Cereal Chemistry**. 58: 502-507.

Biliaderis, C. G. 2009. Structural transitions and related physical properties of starch. pp. 293-372. *In* J.Be Miller and R .Whistler, eds. **Starch : Chemistry and technology**. Academic Press, USA.

Bourne, M. C. 2002. Food Texture and viscosity : concept and measurement. **Academic Press**. New York.

- Chiang, P. Y., P. H. Li, C. C. Huang and C. C. R. Wang. 2007. Changes in functional characteristics of starch during water caltrop (*Trapa Quadrispinosa* Roxb.) growth. **Food Chemistry**. 104: 376-382.
- Eliasson, A. C. and M. Gudmundsson. 1996. Starch: physicochemical and functional aspects. pp. 431-503. *In* Eliasson A.C., ed. **Carbohydrate in food**. Marcel Dekker, Inc.USA.
- Fannon, J. E., R. J. Hauber and J. N. BeMiller. 1992. Surface pores of starch granules. **Cereal Chemistry**. 69: 284-288.
- Ferrini, L. M. K., T. S. Rocha, I. M. Demiate and C. M. L. Franco. 2008. Effect of acid-methanol treatment on the physicochemical and structural characteristics of cassava and maize starches. **Starch/stärke**. 60: 417-425.
- Franco, C. M. L., and C. F. Ciacco. 1992. Factors that affect the enzymatic degradation of natural starch granules- effect of the size of the granules. **Starch/stärke**. 44: 422-426.
- Gallant, D. J., B. Bouchet, A. Buleon and S. Pérez. 1992. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzymatic degradation. **Eur. J. Clin. Nutri.** 46: S3-S16.
- Gebre-Mariam, T. and P. C. Schmidt. 1996. Isolation and physico-chemical properties of enset starch. **Starch/Stärke**. 48: 208-214.
- Hanchett, D. J., T. Kasemsuwan, J. Light and A. Tan. 2002. **Sago fluidity starch and use thereof**. U.S Patent 20020009532A1.
- Hanashiro, I., J. Abe and S. Hizukuri. 1996. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography. **Carbohydrate Research**. 283: 151-159.

- Hizukuri, S. 1985. Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structures of starch granules. **Carbohydrate Research**. 141: 295-306.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain length of amylopectin, and its significance. **Carbohydrate Research**. 147: 342-347.
- Hizukuri, S. 1996. Starch: Analytical aspects. pp. 347-429. *In* A.C. Eliasson, ed. **Carbohydrate in food**. Marcel Dekker, Inc.USA..
- Hoover, R., Y. X. Li, G. Hynes and N. Senanayake. 1997. Physicochemical characterization of mung bean starch. **Food hydrocolloids**. 11: 401-408.
- Hoover, R.. 2000. Acid-treated starches. **Food Rev. Int.** 16(3): 369-392.
- Hoover, R. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydrate Polymer**. 45: 253-267.
- Hoover, R., T. Hughes, H. J. Chung and Q. Liu. 2010. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. **Food Research International**. 43: 399-413.
- Hsu, S., S. Lu and C. Huang. 2000. Viscoelastic changes of rice starch suspensions during gelatinization. **Journal of Food Science**. 65: 215–220.
- Huang, C. C., M. C. Lin and C. C. R. Wang. 2006. Changes in morphological, thermal and pasting properties of yam (*Dioscorea alata*) starch during growth. **Carbohydrate polymer**. 64: 524-531.
- Huang, J., H. A. Schols, J. J. G. Soest, Z. Jin, E. Sulmann and A. G. J. Voragen. 2007. Physicochemical properties and amylopectin chain profiles of cowpea, chickpea and yellow pea starches. **Food Chemistry**. 101: 1338-1345.

- Huang, C. C. 2009. Physicochemical, pasting and thermal properties of tuber starches as modified by guar gum and locust bean gum. **International Journal of Food Science and Technology**. 44: 50-57.
- Hughes, T., R. Hoover, Q. Liu, E. Donner, R. Chibbar and S. Jaiswal. 2009. Composition, morphology, molecular structure, and physicochemical properties of starches from newly released chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars grown in Canada. **Food Research International**. 42: 627-635.
- Hung, P. V. and N. Morita. 2005. Physicochemical properties and enzymatic digestibility of starch from edible canna (*Canna edulis*) grown in Vietnam. **Carbohydrate Polymers**. 61: 314-321.
- James P. Z. n.d. The role and function of specially starches in the confection industry. **National starch and chemical company**.
- Jane, J., L. Shen, J. Chen, S. Lim, T. Kasemsuwan and W. K. Nip. 1992. Physical and Chemical studies of taro starches and flours. **Cereal Chemistry**. 69: 528-535.
- Jane, J. L., K. S. Wong and A. E. McPherson. 1997. Branch-structure difference in starches of A- and B-type X-ray patterns revealed by their Naegeli dextrans. **Carbohydrate Research**. 300: 219-227.
- Jane, J., Y. Y. Chen, L. F. Lee, A. E. McPherson, K. S. Wong, M. Radosavljevic and T. Kasemsuwan. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. **Cereal Chemistry**. 76: 629-637.
- Jane, L., S. G. Ring, T. R. Noel, R. Parker, P. Cairns, K. Findlay and P. R. Shewry. 2002. Characterization of starch from tubers of yam bean (*Pachyrhizus ahipa*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 50: 361-367.

- Jenkins, P. J. and M. Athene. 1997. The effect of acid hydrolysis on native starch granule structure. **Starch/stärke**. 49: 262-267.
- Karim, A. A., M. H. Norziah and C.C. Seow. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. **Food Chemistry**. 71: 9-36.
- Kasemsuwan, T., T. Bailey, and J. Jane. 1998. Preparation of clear noodles with mixtures of tapioca and high-amylose starches. **Carbohydrate Polymers**. 32: 301-312.
- Kennedy, J. F., C. J. Knill and D. W. Taylor. 1995. Maltodextrins. pp. 65-82. *In* M. W. Kearsley and S. Z. Dziedzic, eds. **Handbook of starch hydrolysis products and their derivatives**. Blackie Academic. Glasgow.
- Lang, V. 2004. Development of a range of industrialized cereal- based foodstuffs, high in slowly digestible starch. pp. 477-504. *In*. A.C. Eliasson, ed. **Starch in food**. England: Woodhead Publishing Limited.
- Lehmann, U. and F. Robin. 2007. Slowly digestible starch – its structure and health implication : a review. **Trends Food Sci. Tech**. 18: 346-355.
- Lii, C. Y., Y. Y. Shao and K. H. Tseng. 1995. Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. **Cereal Chemistry**. 72(4): 393-400.
- Light, J. M. 1990. Modified food starches: why, what, where, and how. **Cereal Foods World**. 35(11): 1081-1092.
- Llano, S. L. A., A. L. M. Alegría, J. J. Z. Morales and F. M. Bustos. 2008. Acid thinned jicama and maize starches as fat substitute in stirred yogurt. **LWT**. 41: 1274-1281.

- Lu, T. J., J. H. Lin, J. C. Chen and C. H. Chang. 2008. Characteristics of taro (*Colocasia esculenta*) starches planted in different seasons and their relations to the molecular structure of starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 56: 2208-2215.
- McGrance, S. J., D. E. Mainwaring, H. J. Cornell and C. J. Rix. 2004. The role of hydrogen bonding in amylose gelation. **Starch/stärke**. 56: 122-131.
- Miao, M., T. Zhang and B. Jiang. 2009. Characterizations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China. **Food Chemistry**. 113: 1025-1032.
- Mélo, E. A., N. Krieger and T. L. M. Stamford. 1994. Physicochemical properties of Jacatupé (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) starch. **Starch/stärke**: 46. 245-247.
- Moorthy, S. N. 2004. Tropical sources of starch. pp. 321-359. *In*. Eliasson A.C., ed. **Starch in food**. England: Woodhead Publishing Limited. .
- Morris, V. J. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends Food Sci. Tech.** 2-6.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the series 4 Rapid Visco Analyser**. Warriewood, New South Wales.
- Oates, C. G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends Food Sci. Tech.** 8: 375-382.
- Ohwada, N., K. Ishibashi, K. Hironaka and K. Yamamoto. 2003. Physicochemical properties of mungbean starch. **J. Appl. Glycosci.** 50: 481-485.
- Ortega – Ojeda, F. E., H. Larsson and A. C. Eliasson. 2004. Gel formation in mixtures of amylose and high amylopectin potato starch. **Carbohydrate Polymer**. 57: 55-56.

- Pérez, S., P. M. Baldwin and D. J. Gallant. 2009. Structural feature of starch granule I. pp. 149-152. *In* J. BeMiller and R. Whistler, eds. **Starch : Chemistry and technology**. Academic Press, USA.
- Radley, J. A. 1976. **Starch Production Technology**. Applied Science Publishers Ltd., London.
- Rao, M. A. 1999. **Rheology of fluid and semisolid foods : principles and applications**. Aspen Publishers, Inc. USA.
- Robin, J. P., C. Mercier, R. Charbonniere and A. Guibot. 1974. Lintnerized starches : gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. **Cereal Chemistry**. 51: 389-406.
- Rohwer, R. G. and R. E. Klem. 1984. Acid-modified starch : production and uses, pp. 529-541. *In* R. L. Whistler, J. N. BeMiller and E. F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology**, 2nd ed. Academic Press, New York.
- Sander, J. P. M. 1996. Chemical modification of starch. *In* **Advanced Post-Academic Course on Tapioca Starch Technology**, 22-26 January. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Sandhu, K. S., N. Singh and S. T. Lim. 2007. A comparison of native and acid thinned normal and waxy corn starches : physicochemical, thermal, morphological and pasting properties. **LWT**. 40: 1527-1536.
- Sandhu, K. S. and S. T. Lim. 2008. Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. **Carbohydrate Polymers**. 71: 245-252.
- Shi, Y. C. and P. A. Seib. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. **Carbohydrate research**. 227: 131-145.

Shipman, L. 1967. Manufacture of tapioca, arrowroot, and sago starches, pp. 103-119.

In R. L. Whistler and E. F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology Vol II**. Academic Press, New York.

Singh, N., J. Singh, L. Kaur, N. S. Sodhi and B. S. Gill. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**. 81: 219-231.

Singh, N., K. S. Sandhu and M. Kaur. 2004. Characterization of starches separated from Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. **Journal of Food Engineering**, 63: 441-449.

Singh, J., O. J. McCarthy, H. Singh, P. J. Moughan and L. Kaur. 2007. Morphological, thermal and rheological characterization of starch isolated from New Zealand Kamo Kamo (*Cucurbita pepo*) fruit – A novel source. **Carbohydrate Polymers**. 67: 233–244.

Singh, G. D., A. S. Bawa, C. S. Riar and D. C. Saxena. 2009. Influence of heat-moisture treatment and acid modifications on physicochemical, rheological, thermal and morphological characteristics of Indian water chestnut (*Trapa natans*) starch and its application in biodegradable films. **Starch/stärke**, 61: 503-513.

Sopade, P. A. and K. Kiaka. 2001. Rheology and microstructure of sago starch from Papua New Guinea. **Journal of Food Engineering**. 50: 47-57.

Sodhi, N. S. and N. Singh. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches separated from rice cultivars grown in India. **Food Chemistry**. 80: 99-108.

Srichuwong, S., T. C. Sunarti, T. Mishima, N. Isono and M. Hisamatsu. 2005. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. **Carbohydrate Polymers**. 60: 529-538.

- Srichuwong, S. and J.Jane. 2007. Physicochemical properties of starch affected by molecular composition and structures: A review. **Food Sci. Biotechnology**. 16(5): 663-674.
- 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. **Carbohydrate Polymer**. 38(2): 161-170.
- Steffe, J.F.1996. Rheological Methods in Food Process Engineering. Freeman Press. New York.
- Takeda, Y. and S. Hizukuri. 1987. Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. **Carbohydrate research**. 168: 79-88.
- Tester, R. F. and W. R. Morrison. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. II. waxy rice starches. **Cereal Chemistry**. 67: 558–563.
- Tester, R. F., J. Karkalas and X. Qi. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**. 39: 151-165.
- Tetchi, F. A., A. R. Sabaté, G. G. Amani and P. Colonna. 2007. Molecular and physicochemical characterization of starch from yam, cocoyam, cassava, sweet potato and ginger produced in the Ivory Coast. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 87: 1906-1916.
- Tsegaya, A. and Z. Tadele. 2007. Research on a strategic crop enset to enhance food security in Ethiopia. **Proceedings of an international conference, Bern, Switzerland**, 19-21, September.

- Tulyathan, V., K. Boondet and T. Mahawanich. 2005. Characteristics of starch from water chestnut (*Trapa Bispinosa* Roxb.). **Journal of Food Biochemistry**. 29: 337-348.
- Vandeputte, G. E., V. Derycke, J. Geeroms and J. A. Delcour. 2003. Rice starches. II. Structural aspects provide insight into swelling and pasting properties. **Journal of Cereal Science**. 38: 53-59.
- Walker, D. A. 1976. Preparation of geological samples for scanning electron microscopy, p. 68. Cited by A. Delokkunanund. **Specimen Preparation for SEM**. Kasetsart University, Bangkok.
- Wang, L. and Y. J. Wang. 2001. Structures and physicochemical properties of acid-thinned corn, potato and rice starches. **Starch/stärke**. 53: 570-576.
- Wang, Y. J., V. D. Truong and L. Wang. 2003. Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis. **Carbohydrate Polymers**. 52: 327-333.
- Whistler, R. L. and J. N. BeMiller. 1999. **Carbohydrate chemistry for food scientists**. American Association of Cereal Chemists, Inc USA.
- Wurzburg, O. B. 1986. **Modified starches : Properties and Uses**. CRC Press, Inc., Florida.
- Young, A. H. 1984. Fractionation of Starch. pp. 249-283. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall., eds. **Starch : Chemistry and technology**. Academic Press. London.
- Zeng, M., C.F.Morris, I.L. Batey and C.W. Wrigley. 1997. Source of variation for starch gelatinization, pasting and gelation properties in wheat. **Cereal Chemistry**. 74: 63-71.





1. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

1.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องมือย่อย (2006 Digestor Exhaust system)
- 2) เครื่องกลั่นไนโตรเจน (1026 Distilling unit Kjelttec system)
- 3) ขวดแก้วเจตาห์ล (Kjeldahl flask)
- 4) บิวเรต
- 5) ตู้ดูดควัน

1.2 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.84
- 2) สารละลายกรดบอริก ร้อยละ 4 ของน้ำหนัก
- 3) สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- 4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 40 ของน้ำหนัก
- 5) ตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3.5 กรัม โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2PO_4) และ 0.4 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$)

1.3 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ซึ่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วเจตาห์ล โดยระวังอย่าให้ติดข้างขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ช้อน เติมกรดซัลฟูริก 15 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบาๆ วางบนขวดเครื่องย่อยในตู้ดูดควัน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที จนกระทั่งได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำไปเข้าเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยต่อท่อให้ปลายจุ่มในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุกรดบอริกร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร เพื่อเก็บแอมโมเนีย กลั่นประมาณ 5 นาที แล้วนำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละไนโตรเจน

1.4 วิธีคำนวณ

$$\frac{\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)}}{= \frac{(S-B) \times N \times 1.401 \times 6.25 \times 100}{W \times (100-M)}}$$

เมื่อ S = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรต Blank (มิลลิลิตร)

N = นอร์มัลลิตีของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

M = ร้อยละความชื้น

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

2.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soctex system HT 1046 Service unit และ Soctex system HT2 1045 Extraction unit)
- 2) เครื่องทำความเย็น (CTL 911)
- 3) ถ้วยอะลูมิเนียม (Extraction cups)
- 4) คีมสำหรับจับถ้วยอะลูมิเนียม
- 5) ทิมเบิล (Thimble)
- 6) กระดาษกรองเบอร์ 1

2.2 สารเคมี

- 1) ปีโตรเลียมอีเทอร์
- 2) อะซิโตน

2.3 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ชั่งตัวอย่างประมาณ 2.5 กรัม บนกระดาษกรองและห่อให้มิดชิด จากนั้นนำมาใส่ลงในทิมเบล นำทิมเบลใส่ใน 1045 Extraction unit ซึ่งเชื่อมต่อกับ 1046 Service unit โดยใช้ adapter นำ Extraction cups ไปอบและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นเติมตัวทำละลายประมาณ 45 มิลลิลิตร นำ Extraction cups เข้าไปใน Soxhlet system HT2 1045 Extraction unit พร้อมทั้งเลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง boiling และสกดเป็นเวลา 45 นาที นำ Extraction cups ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้ง Extraction cups ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณร้อยละของไขมัน

2.4 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{W}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของ Extraction cups (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของ Extraction cups และตัวอย่างหลังอบแห้ง (กรัม)

3. การวิเคราะห์ปริมาณเก่า

3.1 วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีของ AOAC (1990) ชั่งตัวอย่างประมาณ 5 กรัม ในจานกระเบื้องเคลือบที่เผาและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำไปเผาด้วยไฟอ่อนๆ จนหมดควัน แล้วนำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 ± 20 องศาเซลเซียส นานประมาณ 2-3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือสีเทานำออกมาวางในเดซิเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เผาตัวอย่างซ้ำนานครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม ถือเป็นน้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบและตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่

3.2 วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณเก่า (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{(W_1 - W)}$$

เมื่อ W = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของจานกระเบื้องเคลือบ และตัวอย่างหลังเผาจนได้น้ำหนักคงที่ (กรัม)

4. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาตามวิธีของ Walker (1976)

4.1 เครื่องมือ

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, Joel JSM 5310, England)
- 2) แท่ง Aluminium stub ซึ่งติดเทปกาวสองหน้าชนิดบาง
- 3) เดซิเคเตอร์ที่มีสารดูดความชื้น

4.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) นำตัวอย่างไปอบในตู้อบสูญอากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วใส่ในเดซิเคเตอร์ รอจนกระทั่งเย็น
- 3) นำตัวอย่างแบ่งปริมาณเล็กน้อยมากระจายตัวบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่ง aluminium stub
- 4) นำแท่ง aluminium stub ที่ติดตัวอย่างแบ่งแล้วเข้าเครื่องเคลือบทองเพื่อเคลือบผิวของแบ่งตัวอย่างซึ่งช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน
- 5) ใส่แท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองแล้วในช่องใส่ตัวอย่างภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 1,000 เท่า
- 6) เลือกภาพของอนุภาคแบ่งที่ต้องการและบันทึกภาพดังกล่าวลงแผ่นซีดี

5. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้ง (Shi และ Seib, 1992)

5.1 เครื่องมือ

X-ray diffractometer (Bruker AXS D5005, Germany)

5.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) ชั่งแป้งตัวอย่าง (ค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8-10) ประมาณ 5 กรัม บรรจุลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง ทำผิวตัวอย่างให้เรียบ
- 2) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแป้งด้วยเครื่อง x-ray powder diffractometer โดยใช้สภาวะการทดสอบคือ ใช้ Target เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 50 มิลลิแอมป์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 4 ถึง 38 องศา 2-theta
- 3) บันทึกรูปแบบของ x-ray diffraction ที่ได้

6. การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส ตามวิธีของ Takeda *et al.* (1987)

6.1 เครื่องมือ

เครื่อง automatic amperometric titrator (835 Titrando, Metrohm, Herisau, Switzerland)

6.2 สารเคมี

- 1) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์
- 2) สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์
- 3) สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) เข้มข้น 0.00167 โมลาร์
- 4) สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้น 0.4 โมลาร์

6.3 วิธีวิเคราะห์

- 1) ชั่งแบ่งที่ผ่านการสกัดไขมันแล้ว 60-100 มิลลิกรัมใส่ลงในบีกเกอร์
- 2) เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร กวนจนตัวอย่างละลายแล้วนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
- 3) ตูดตัวอย่างใส่ภาชนะที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 80 มิลลิลิตร
- 4) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับความเป็นกรดต่างให้มีค่าเป็นกลาง
- 5) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
- 6) นำสารผสมตัวอย่างทั้งหมดไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.00167 โมลาร์ด้วยเครื่องอัตโนเมตริก (835 Titrand, Metrohm, Herisau, Switzerland) จนกระทั่งถึงจุดยุติ โดยบันทึกปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตและค่าของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยหัววัด Pt electrodes

7. การวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่ที่เป็นองค์ประกอบของแป้งตามวิธีของ Bertoft (2004)

7.1 เครื่องมือ

เครื่อง High performance anion exchange chromatography ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์ แบบ Pulsed amperometric detector (HPAEC-PAD)

7.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) นำตัวอย่างแป้งจำนวน 6 มิลลิกรัม ที่ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 4.69 มิลลิลิตร ต้มในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำมาตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส
- 2) เติมน้ำฟอสเฟอรัสเจียมอะซิเตตเข้มข้น 1 โมลาร์ (พีเอช 3.5) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร จากนั้นจึงเติมเอนไซม์ *Pseudomonas isoamylase* (10 µg protein/ 10 µl, 590 unit) จำนวน 10 ไมโครลิตร
- 3) บ่มสารละลายที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2.5 ชั่วโมง พร้อมทั้งเขย่าตลอดเวลาที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที หยุดปฏิกิริยาโดยการเติมสารละลายโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร

4) วิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่ด้วยเครื่อง HPAEC-PAD โดยใช้คอลัมน์ Carbpac PA 100 (250X4 mm.) วัฏภาคเคลื่อนที่ประกอบด้วย eluent A คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ และ eluent B คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ละลายในสารละลายโซเดียมอะซิเตรท เข้มข้น 500 มิลลิโมลาร์ ควบคุมการไหลของ eluent B ให้เป็นแบบ gradient และมีอัตราการไหล เท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อ นาที

8. การเปลี่ยนแปลงความหนืด

8.1 เครื่องมือ

เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA 4, Neport Scientific, Australia)

8.2 วิธีวิเคราะห์

1) ชั่งแบ่งตัวอย่าง 3 กรัม (ที่ความชื้นร้อยละ 14) ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้น้ำหนักรวม 28 กรัม

2) นำเข้าเครื่อง RVA โดยให้ความเร็วรอบของใบกวน 960 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 วินาที หลังจากนั้นควบคุมความเร็วรอบใบกวนที่ 160 รอบต่อนาที

3) ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส ตั้งค่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 95 องศาเซลเซียส รักษาให้อุณหภูมิคงที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 นาที จากนั้นจึงลดมาที่ 50 องศาเซลเซียสด้วยอัตราเดียวกัน

4) ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ทำให้แป้งเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature, °C) ความหนืดที่จุดสูงสุด (Peak viscosity, P, RVA) ความหนืดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (H, RVA) ความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (C, RVU) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด (Breakdown, P-H, RVU) การคืนตัวของแป้ง (Setback from peak, C-P, RVU) ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดที่จุดสูงสุด

9. การวิเคราะห์ลักษณะการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Sriroth *et al.*, 1999)

9.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องมือ Differential Scanning Calorimeter (DSC 7, PERKIN ELMER, USA)
- 2) Aluminum pan
- 3) เครื่องปิดผนึก Aluminum pan

9.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) เตรียมตัวอย่างแป้ง โดยชั่งแป้ง 3 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงใน Aluminum pan เติมน้ำกลั่นลงไป โดยคำนวณให้ได้น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
- 2) บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก Aluminum pan น้ำแป้ง
- 3) นำอินเดียม (indium) ใส่ในช่องไฟ pan ของเครื่อง DSC เพื่อเป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบและตั้งค่าของเครื่อง
- 4) นำ Aluminum pan น้ำแป้งใส่ในช่องไฟ pan แทนอินเดียม ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดเจลลาทีในเซชันของแป้งเปรียบเทียบกับ pan เปลา โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 105 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 5) ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (Onset temperature, T_{OG}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (Peak temperature, T_{PG}) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (Conclusion temperature, T_{CG}) และช่วงของอุณหภูมิ (temperature range, $T_{CG}-T_{OG}$) ของการเกิดเจลลาทีในเซชัน หน่วยเป็นองศาเซลเซียส และพลังงานที่เปลี่ยนแปลง (enthalpy, ΔH_G) หน่วยเป็นจูลต่อกรัม

10. การวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชัน

10.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องมือ Differential Scanning Calorimeter (DSC 7, PERKIN ELMER, USA)
- 2) Aluminum pan
- 3) เครื่องปิดผนึก Aluminum pan

10.2 วิธีวิเคราะห์

1) นำตัวอย่างแป้งที่ผ่านการทดสอบการเกิดเจลลิตในเซชันแล้ว ซึ่งบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

2) นำอินเดียม (indium) ใส่ในช่องไฟ pan ของเครื่อง DSC เพื่อเป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบและตั้งค่าของเครื่อง

3) นำ Aluminum pan น้ำแป้งใส่ในช่องไฟ pan แทนอินเดียม ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเปรียบเทียบกับ panเปล่า โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 105 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

4) ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (Onset temperature, T_{OR}) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature, T_{PR}) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (Conclusion temperature, T_{CR}) ของการเกิดรีโทรเกรเดชัน หน่วยเป็นองศาเซลเซียส พลังงานที่เปลี่ยนแปลง (enthalpy, ΔH_R) หน่วยเป็นจูลต่อกรัม และร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (% Retrogradation, %R)

$$\text{ค่าร้อยละของการเกิดรีโทรเกรเดชัน} = \frac{\Delta H \text{ of retrograded starch} \times 100}{\Delta H \text{ of native starch}}$$

(% Retrogradation)

11. การวิเคราะห์สมบัติวิภาคการไหล

11.1 เครื่องมือ

เครื่อง Rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany) หัวกดแบบ parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กำหนดช่องว่างสำหรับใส่ตัวอย่าง (gap size) เท่ากับ 1,000 ไมครอน

11.2 วิธีวิเคราะห์

1) เตรียมสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2) เทตัวอย่างลงบนแท่นวางตัวอย่าง (rheometer platform) ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิจาก 95 ถึง 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที

3) ตรวจวัดค่า storage modulus (G') และ loss Modulus (G'')

12. การวิเคราะห์ degree of enzyme hydrolysis ตามวิธีของ Miao et al. (2009)

12.1 สารเคมี

- 1) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.2 โมลาร์ พีเอช 5.2
- 2) เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส จากเชื้อ *Aspergillus niger* (Megazyme, Ireland)
- 3) เอทานอล
- 4) ชุดทดสอบ (oxidase-peroxidase assay kit, Megazyme, Wicklow, Ireland)

12.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) ชั่งตัวอย่างแป้งจำนวน 200 มิลลิกรัม แล้วจึงเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.2 โมลาร์ พีเอช 5.2 ปริมาตร 15 มิลลิกรัม
- 2) เติมสารละลายเอนไซม์ผสม (เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (290 u/ml) และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (15 u/ml) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
- 3) นำไปบ่มในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 37 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างทุก 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 นาที
- 4) เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร มาเติมสารละลายเอทานอล 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน บั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณด้วยชุดทดสอบ ปริมาณกลูโคสที่ได้นำไปคำนวณเป็นปริมาณแป้งโดยคูณด้วย 0.9
- 5) ปริมาณแป้งทั้งหมดนำไปคำนวณระดับในการย่อย (Degree of enzyme hydrolysis) ดัดแปลงจาก Hung and Morita (2005)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละระดับในการย่อย} &= \frac{\text{ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ (กรัม)}}{\text{ปริมาณแป้งเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100 \\ (\% \text{ Degree of enzyme hydrolysis}) & \end{aligned}$$

13. ค่าความหนืดดัดแปลงจาก Sopade and Kiaka (2001)

13.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer, RVDA-II, Stoughton, MA, USA)
- 2) มอเตอร์สำหรับกวน (Stirring motor, IKA Labortechnik, Germany)
- 3) อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath, WB 14, Germany)

13.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) เตรียมสารละลายน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10 กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) ให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ด้วยใบกวน ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที
- 3) นำไปวัดความหนืดโดยใช้หัวเข็มหมายเลข 31 (spindle number) ความเร็วรอบของหัวเข็มเท่ากับ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และบันทึกค่า

14. วิเคราะห์ค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity) ดัดแปลงจากวิธีของ Hanchett et al. (2002)

14.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวัดความหนืด (Thomas-Stormer Viscometer, 9730 F10, USA)
- 2) มอเตอร์สำหรับกวน (Stirring motor, IKA Labortechnik, Germany)
- 3) อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath, WB 14, Germany)

14.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) ชั่งแป้งตัวอย่างผสมกับน้ำกลั่นให้ได้น้ำหนักรวมที่ต้องการขึ้นกับความหนืดของตัวอย่าง (ตารางผนวกที่ 1) โดยที่การเตรียมตัวอย่าง แบบ a จะใช้เตรียมตัวอย่างที่มีความหนืดมาก ที่มีน้ำหนักรวม 107 กรัม แบบ b มีน้ำหนักรวม 110 กรัม แบบ c มีน้ำหนักรวม 113 กรัม และแบบ d จะใช้เตรียมตัวอย่างที่มีความหนืดน้อยที่มีน้ำหนักรวม 115 กรัม เมื่อ

วิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการหมุนครบ 100 รอบ ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดให้เปลี่ยนความเข้มข้นที่เครื่องสามารถหมุนครบ 100 รอบได้ค่าเวลาในช่วงที่กำหนด

2) ให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยใบกวน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

3) นำไปวัดค่าการไหลเทียบกับน้ำ ที่อุณหภูมิในช่วง 81-83 องศาเซลเซียส บันทึกเวลาที่เครื่องหมุน ครบ 100 รอบ

ตารางผนวกที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าการไหลเทียบกับน้ำ

น้ำหนักแป้ง (กรัม)			
6.16 ^a	8.80 ^b	11.44 ^c	13.20 ^d
เวลาที่ใช้ในการหมุนครบ 100 รอบ (วินาที)			ค่าการไหลเทียบกับน้ำ (Water Fluidity : WF)
60.0			5
39.6			10
29.3			15
22.6			20
20.2			25
	33.4		30
	27.4		35
	22.5		40
		32.5	45
		26.8	50
		22.0	55
			60
			65
			70
			75
			80
			85
			90

หมายเหตุ : ^a สารละลายน้ำแป้งน้ำหนักรวม 107 กรัม

^b สารละลายน้ำแป้งน้ำหนักรวม 110 กรัม

^c สารละลายน้ำแป้งน้ำหนักรวม 113 กรัม

^d สารละลายน้ำแป้งน้ำหนักรวม 115 กรัม

15. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นตัวตัดแปลงจากวิธีของ Hanchett *et al.* (2002)

15.1 เครื่องมือ

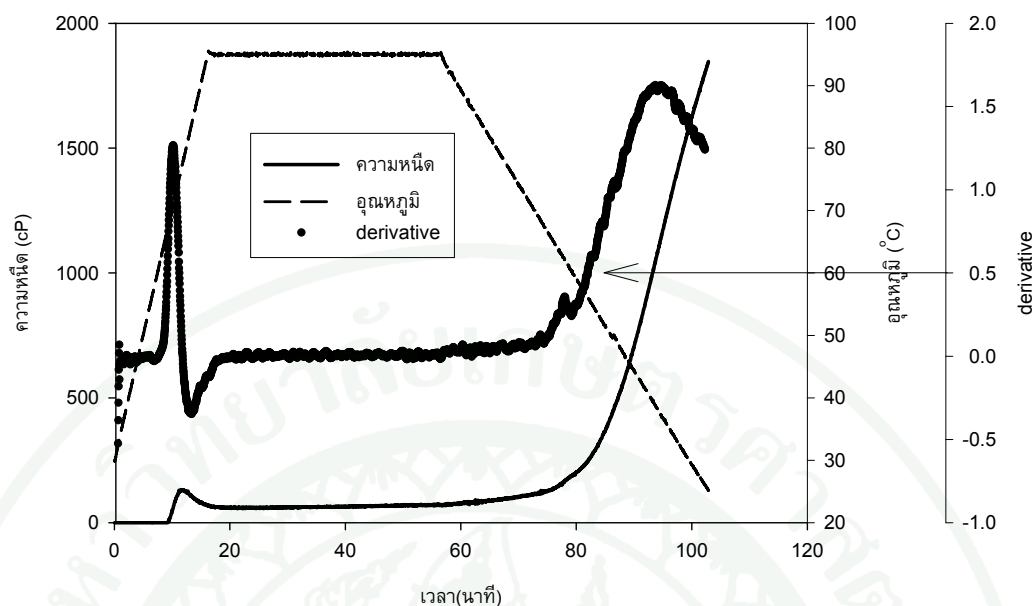
เครื่องวัดความหนืดแป้ง (Rapid Viscosity Analyzer, RVA 4D, Newport Scientific, Australia)

15.2 วิธีวิเคราะห์

1) ชั่งแป้งตัวอย่างความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) สำหรับการวิเคราะห์ แป้งตัดแปรด้วยกรด และความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก) สำหรับการวิเคราะห์แป้งผสม ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้น้ำหนักรวม 28 กรัม

2) นำเข้าเครื่อง RVA โดยให้ความเร็วรอบของใบกวน 160 รอบต่อนาที

3) ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 4 องศาเซลเซียสต่อนาที รักษาอุณหภูมิให้คงที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 1.5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ตรวจวัดอุณหภูมิที่ทำให้แป้งเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็น (gelation temperature, องศาเซลเซียส) โดยใช้เกณฑ์การเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างรวดเร็วเมื่อแป้งเปียกได้รับอุณหภูมิ ต่ำลง การอ่านค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดทำเมื่อค่า first derivative ของค่าความหนืดเท่ากับ 0.5 และความหนืดที่จุดสุดท้าย (Final viscosity, RVU)



ภาพผนวกที่ 1 ตัวอย่างกราฟ RVA ใช้อ่านค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดและความหนืดสูงสุด

16. การวิเคราะห์สมบัติทางด้านเนื้อสัมผัส

16.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA.XT plus, Stable Micro System, UK)
- 2) อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath, WB 14, Germany)

16.2 วิธีวิเคราะห์

- 1) เตรียมสารละลายน้ำแป้งที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก)
- 2) เขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
- 3) เทใส่ถุงทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จากนั้นมัดปากถุง
- 4) นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- 5) นำตัวอย่างเจลที่ได้ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- 6) ตัดตัวอย่างให้มีความสูง 15 มิลลิเมตร ลอกพลาสติกออกก่อนทำการวัดค่า

7) ค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) ของเจลแบ่ง ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความสามารถเกาะรวมกัน (Cohesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และความยากง่ายในการเคี้ยว (Gumminess)

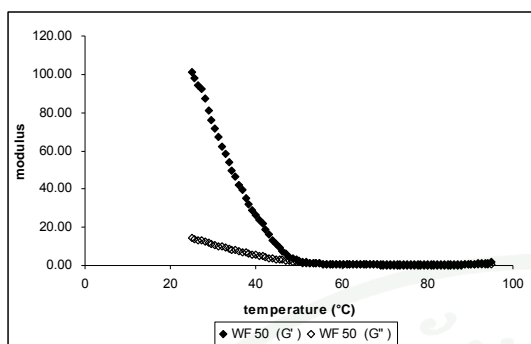


มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

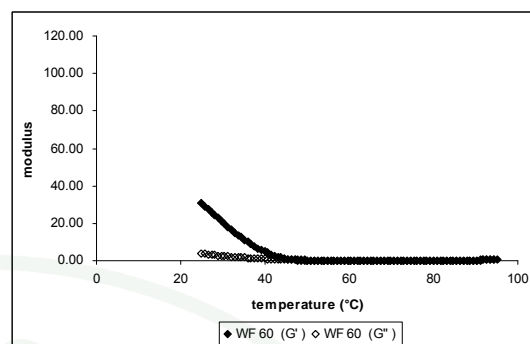
ภาคผนวก ข

Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยกรด

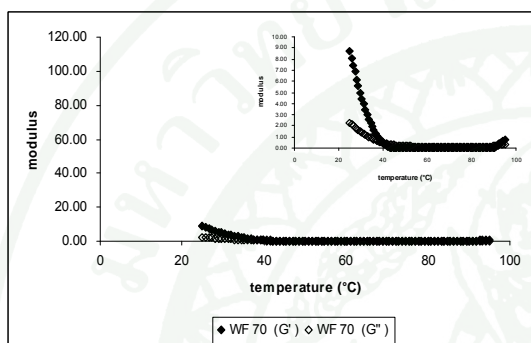
พ.ศ. ๒๕๕๖



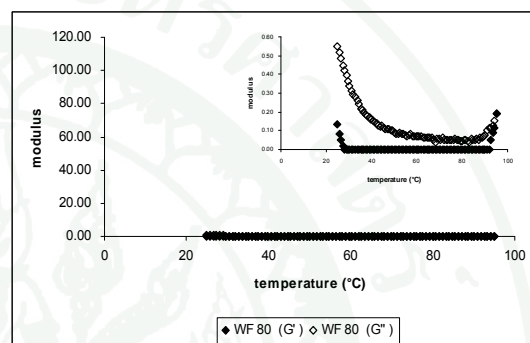
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพผนวกที่ 2 Storage modulus (G') และ loss modulus (G'') ของแป้งมันสำปะหลัง
ดัดแปรด้วยกรดที่มีค่า WF 50 (ก), WF 60 (ข), WF 70 (ค) และ WF 80 (ง)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

- ชื่อ-นามสกุล : นางสาวศิริธร เลิศพานิช
- ประวัติการศึกษา : วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ทุนการศึกษาที่ได้รับ : ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร
สำนักพัฒนาระบบบริหารและการวิจัยสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
กระทรวงศึกษาธิการ