

สถานะในกระบวนการผลิตและสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลัง ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

Preparation Conditions and Physico-chemical Properties of Cassava Starch Oxidized by Sodium Hypochlorite

คำนำ

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ของโลก แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้ส่วนมากส่งออกไปจำหน่ายในต่างประเทศในรูปของแป้งดิบซึ่งมีราคาถูกลง การใช้ประโยชน์ของแป้งมันสำปะหลังดิบในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังดิบมีคุณสมบัติบางประการไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรม แนวทางหนึ่งในการเพิ่มความหลากหลายในการนำไปใช้ของแป้งดิบสามารถทำได้ โดยการดัดแปรแป้งซึ่งจะช่วยปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของแป้งให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในแต่ละอุตสาหกรรมมากขึ้น

แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งดัดแปรทางเคมีชนิดหนึ่งซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรมกระดาษ การผลิตแป้งออกซิไดซ์ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาของแป้งกับสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม สารออกซิไดซ์มีหลายชนิด เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เป็นต้น แต่ในการผลิตแป้งออกซิไดซ์ทางการค้า นิยมใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์มากที่สุด การทำปฏิกิริยาของแป้งกับสารออกซิไดซ์จะส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของแป้งเปลี่ยนไป กล่าวคือหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลแป้งจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันมีการทำลายพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลแป้ง ทำให้โมเลกุลแป้งมีขนาดสั้นลง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าว มีผลทำให้คุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งดัดแปรเปลี่ยนแปลงไป แป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์จะมีความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งดิบ ทำให้สามารถเตรียมแป้งเปียกที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นได้ หมู่คาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นในโมเลกุลแป้งจะทำให้อัตราการคืนตัวของแป้งเปียกลดลง แป้งเปียกและเจลแป้งจึงมีความคงตัวสูงขึ้นและฟิล์มที่ผลิตจากแป้งออกซิไดซ์จะมีความใสมากขึ้นด้วย คุณสมบัติดังกล่าวทำให้มีการนำแป้งออกซิไดซ์มาใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้เป็น

สารเคลือบกระดาษ (surface sizing) นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การทำ ลูกกวาด ลูกอม และเป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบผิว

โดยทั่วไปคุณสมบัติของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ที่สำคัญได้แก่ ชนิดของแป้ง ชนิดของสารออกซิไดซ์ และสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในการผลิตแป้งออกซิไดซ์เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการและเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของกระบวนการผลิตและโครงสร้าง ตลอดจนสมบัติของแป้งดัดแปรที่ผลิตได้ เพื่อให้สามารถออกแบบและควบคุมสภาวะของกระบวนการผลิตได้เหมาะสมและสามารถผลิตแป้งดัดแปรที่มีสมบัติตามที่ต้องการได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะในกระบวนการผลิตต่อสมบัติของแป้งออกซิไดซ์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์

วัตถุประสงค์

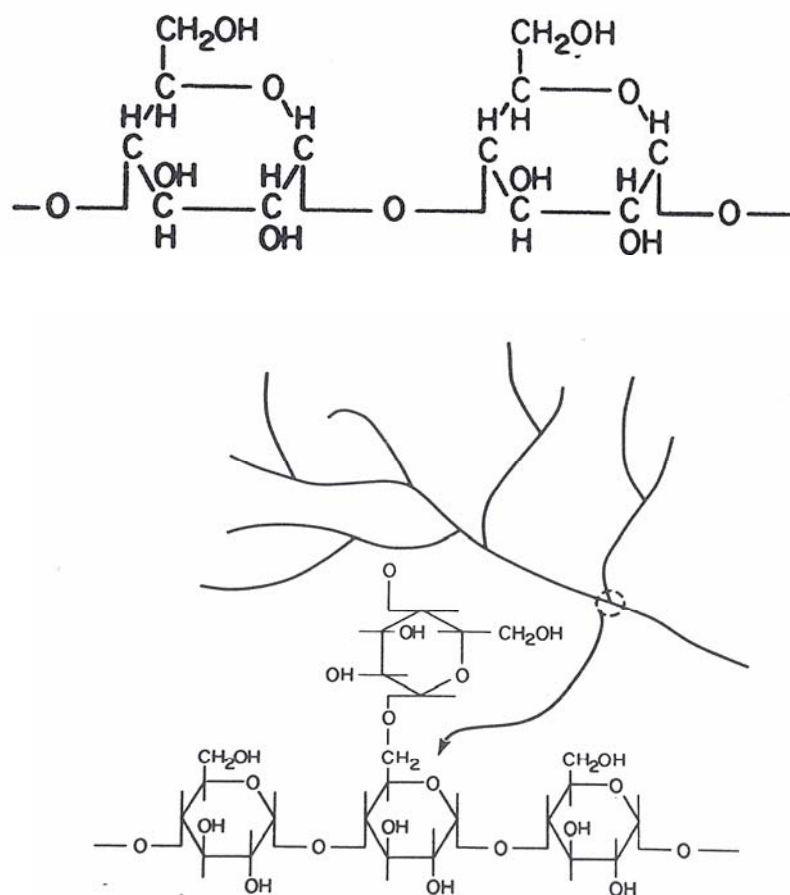
เพื่อศึกษาผลของสภาวะในกระบวนการผลิตแป้งออกซิไดซ์ที่ดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์และโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ได้

การตรวจเอกสาร

1. องค์ประกอบและโครงสร้างของแป้ง

คำว่า “แป้ง” ที่คนไทยเรียกกันทั่วไปนั้นได้รวมความหมายเกี่ยวกับการเรียกแป้งในภาษาอังกฤษ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน คือ แป้งฟลาว (flour) และแป้งสตาร์ช (starch) ซึ่งทั้งคู่มีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยแป้งฟลาว (flour) หมายถึง แป้งที่นำวัตถุดิบมาไม่หรือบดจนละเอียดมาก มีส่วนประกอบของสารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบดั้งเดิมทั้งหมด คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุต่างๆ ส่วนแป้งสตาร์ช (starch) หมายถึง แป้งที่ผ่านกรรมวิธีการแยกเอาเฉพาะส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต โดยมีสารอื่นปะปนน้อยที่สุด ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแป้งที่เป็นสตาร์ช (อรพิน, 2533)

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546ก) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และ อะมิโลเพกทิน (amylopectin) อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic ส่วนอะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสเชิงเส้นขนาดสั้นที่ถูกเชื่อมต่อกันเป็นกิ่งก้านด้วยพันธะ α -1, 6-glucosidic (Gallant *et al.*, 1992) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินแตกต่างกันโดยแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 16-18 และมีปริมาณอะมิโลเพกทินประมาณร้อยละ 80



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

ที่มา: Rutenberg (1980)

ภายในเมล็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของ อะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ซึ่งเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน การเกาะเกี่ยวนี้จะทำให้เกิด โครงสร้างที่มีลักษณะชั้นๆ ของส่วนโครงสร้างผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) สลับกันไปมาอย่างเป็นระเบียบ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงโพลาไรซ์จะเกิด ปรากฏการณ์ cross pattern ที่เรียกว่า birefringence ส่วนที่มีดที่ปรากฏเป็นสองแขนตัดกันเป็น ตำแหน่งของสายโมเลกุลอะมิโลส และอะมิโลเพกทินที่อยู่ในลักษณะตั้งฉาก และขนานกับแสง โพลาไรซ์ ส่วนพื้นที่สว่างจะเป็นตำแหน่งของสายโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่ไม่ได้ ตั้งฉากหรือขนานระนาบแสง ส่วนผลึกเป็นบริเวณที่มีการพองตัวอย่างจำกัดจึงมีความสามารถในการ ทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ยาก อีกส่วนหนึ่ง คือ บริเวณอสัณฐาน ซึ่งมีการจัดเรียงแบบหลวมจึง ดูดซึมน้ำและเกิดปฏิกิริยาเคมีดีกว่าส่วนที่เป็นผลึก (Oates, 1997; Radley, 1976)

2. แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz มีถิ่นกำเนิดในตอนกลางของประเทศบราซิล มีชื่อแตกต่างกันตามท้องถิ่น เช่น yucca, tapioca, cassava, mandioca (Shipman, 1967) โดยในทางพฤกษศาสตร์ มันสำปะหลังจัดเป็นพืชในวงศ์ (class) ใบเลี้ยงคู่ (dicotyledoneae) ตระกูล (family) Euphobiaceae (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

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

2.1 สมบัติพื้นฐาน

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่สกัดจากหัวมันสำปะหลัง มีสตาร์ชมากกว่าร้อยละ 95 มีปริมาณโปรตีนค่อนข้างต่ำ มีฟอสฟอรัสต่ำกว่าร้อยละ 0.04 ซึ่งเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสตาร์ช ในรูปฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Atichokudomchai and Varavinit, 2003) คุณลักษณะของแป้งมันสำปะหลังตามมาตรฐานอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง

คุณภาพ		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
ความชื้น	ไม่เกิน	13	14	14
แป้ง (คำนวณจากน้ำหนักแห้งเป็น ร้อยละ)	ไม่น้อยกว่า	97.5	96	94
เถ้า (คำนวณจากน้ำหนักแห้งเป็น ร้อยละ)	ไม่เกิน	0.15	0.3	0.5
เถ้าที่ไม่ละลายในกรด (คำนวณจากน้ำหนักแห้งเป็นร้อยละ)	ไม่เกิน	0.05	0.10	0.15
โปรตีน (คำนวณจากน้ำหนักแห้งเป็น ร้อยละ)	ไม่เกิน	0.3	0.3	0.3
เยื่อ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/50 กรัมก่อนอบแห้ง)	ไม่เกิน	0.2	0.5	1.0
ความเป็นกรด-ด่าง		4.5-7	3.5-7	3.0-7
ความละเอียดแป้งที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร	ไม่เกิน	1	3	5

ที่มา: มอก. 274-2521

2.1.1 ลักษณะของสี

หัวมันพันธุ์ต่างกันจะมีสีเนื้อแตกต่างกัน ซึ่งมีตั้งแต่สีขาว สีขาวนวลจนถึงสีเหลือง จากรายงานของ CIAT พบว่ามีองค์ประกอบของ phenolic, leucoanthocyanin และ catechin ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสีน้ำเงินและดำ รวมถึงพบสารประกอบ scopoletin และ coumarin (ก้านรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) สารประกอบดังกล่าวมีลักษณะ โครงสร้างเป็นพันธะเดี่ยว และพันธะคู่ยึดจับกันซึ่งสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นบางช่วงแล้วสะท้อนแสงคลื่นอื่นมาที่นัยน์ตาเรา (สมจิตต์ และ วรรณภา, 2544) ในกระบวนการผลิตจึงมีการเติมกำมะถันซึ่งจัดเป็นสารฟอกขาวชนิดหนึ่งช่วยในการกำจัดสี ทำให้แป้งมีความขาวขึ้น

2.1.2 ขนาดและรูปร่าง

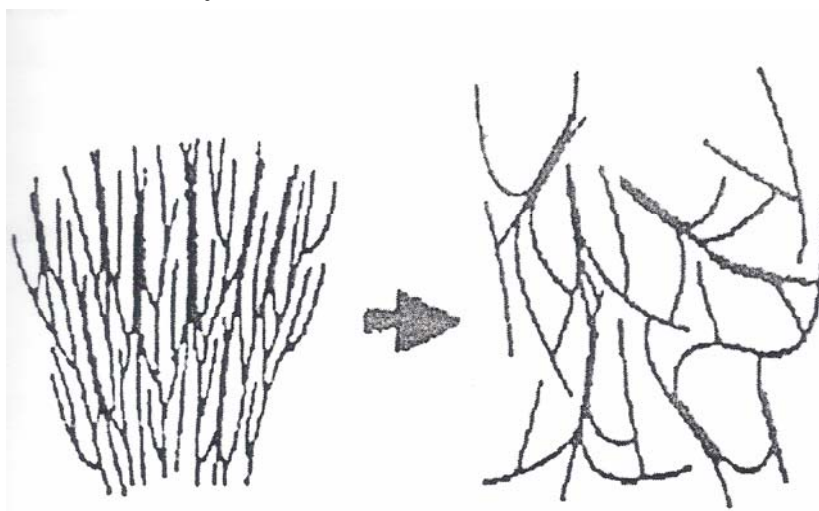
ลักษณะของแป้งเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2 ถึง 8 เม็ดมารวมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร แต่ละเม็ดยาว 5 ถึง 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากเป็นรูปไข่ที่มีปลายด้านหนึ่งถูกตัดออก และผิวส่วนที่ตัดออกจะเว้าเข้าข้างในคล้ายรูปปากแตร บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอ

เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) พบว่าผิวหนังของเม็ดแป้งจะมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ (Sriroth *et al.*, 1999)

2.2 สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์

2.2.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำ แต่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณร้อยละ 25-30 และมีการพองตัวเล็กน้อย ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์และชนิดของแป้ง จากการทดลองของ Leach (1965) พบว่าแป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณ 42.9 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม



ภาพที่ 2 การพองตัวของโครงสร้างร่างแหในแกรนูลแป้ง

ที่มา: Leach *et al.* (1959)

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งให้สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในเม็ดแป้งจะหายไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่

ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป โดยแป้งมันสำปะหลังมีการพองตัวเพียงชั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า

2.2.2 ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนอะมิโลสต่ออะมิโลเพกทิน อุณหภูมิ ความเข้มข้น และการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ

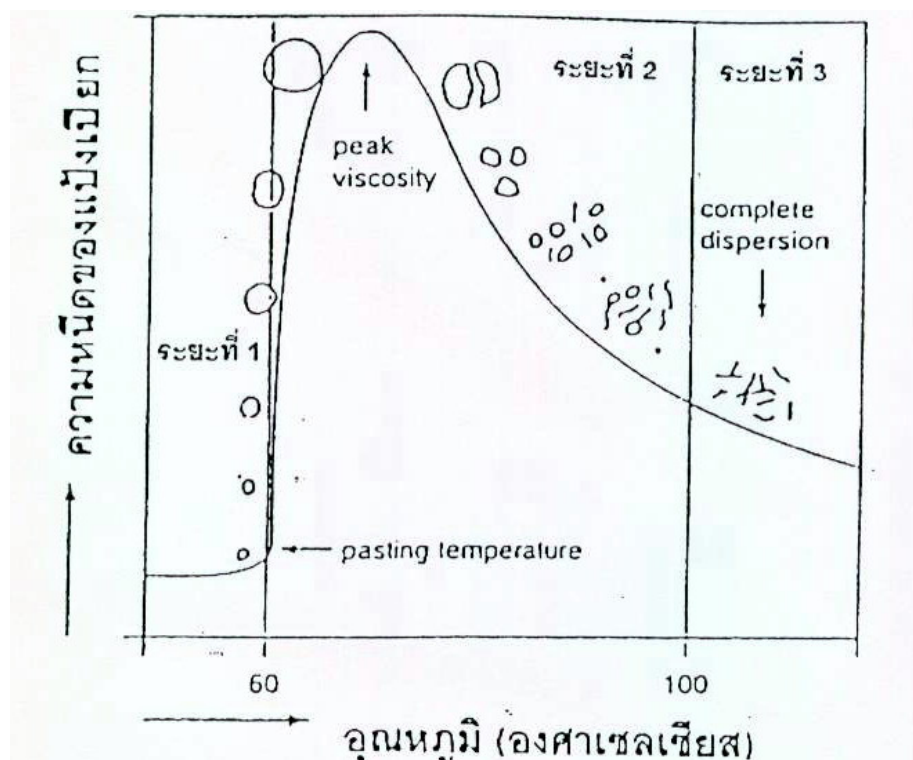
ก. การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง

การเกิดปฏิกิริยากับน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ คือ

ระยะแรก : เมื่ออยู่ในน้ำเย็น แกรนูลแป้งจะสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย เนื่องจากส่วนที่เป็นผลึกสามารถยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรูปร่างและยังมีสมบัติ birefringence อยู่ เมื่อนำไปทำให้แห้งก็จะได้ลักษณะเหมือนเดิม (Leach *et al.*, 1959)

ระยะที่สอง : เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันจะทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายลง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำแล้วพองตัวอย่างรวดเร็วแบบผันกลับไม่ได้ ทำให้แป้งมีความหนืดและความใสมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การเกิดเจลลิตีในเซชัน (gelatinization) และเรียกอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืดว่า pasting temperature แกรนูลแป้งจะมีการเปลี่ยนรูปร่าง และสูญเสียสมบัติ birefringence แกรนูลแป้งจะมีการพองตัวสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของแป้งสูงขึ้น การเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งจะแตกต่างกันไปในแป้งแต่ละชนิด ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ปริมาณไขมัน รวมทั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในแกรนูลแป้ง (Wurzburg, 1986)

ระยะที่สาม : เมื่อเกรนูลแป้งมีการพองตัวสูงสุดที่จุด peak viscosity แล้วเกรนูลแป้งจะเริ่มแตกออก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป จะไปทำให้เกรนูลแป้งเริ่มเข้าสู่ระยะที่สามคือเกรนูลแป้งจะมีการแตกตัวอย่างสมบูรณ์ การละลายของแป้งจะสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 3 ระยะในการเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2546ก)

ข. วิธีวัดความหนืด

วิธีการตรวจวัดความหนืดสามารถทำได้หลายวิธี และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดต่างๆ กัน ดังนี้

1) Brookfield Viscometer สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลวที่วัดได้คือ ค่าความต้านทานของการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัว ค่านี้จะคูณด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว หน่วยของความหนืดเป็น centipoise

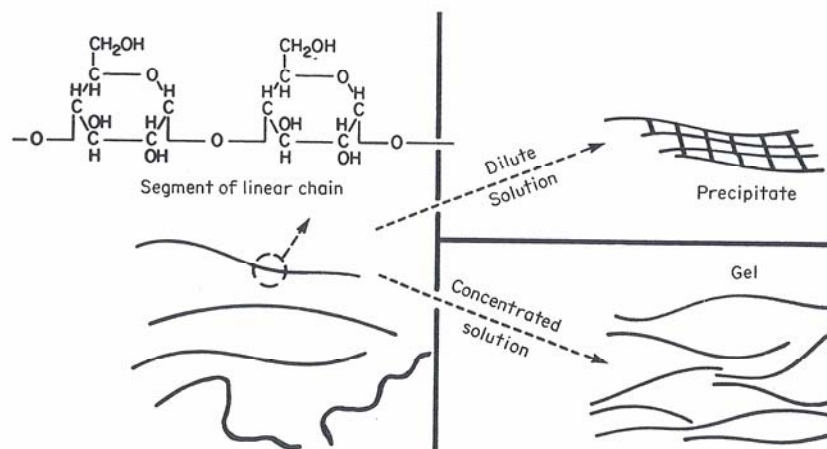
2) Capillary Viscometer สามารถใช้วัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น หน่วยของความหนืดเป็น mPa.s

3) Brabender Amylograph เป็นวิธีที่แพร่หลาย หลักการทำงาน คือ การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้อุ่นจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผลและแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้หน่วยของความหนืดเป็น Brabender Unit (BU)

4) Rapid Visco Analyzer เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษคือมีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้อุ่นและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ หน่วยของความหนืดเป็น Rapid Visco Unit (RVU)

2.2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเกิดขึ้นหลังจากแป้งที่เกิดการเจลาทิไนเซชันแล้วถูกทำให้เย็นตัวลง เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างแอสสามิตีขึ้นโดยโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเข้ามาจับกันหรือจับกับอะมิโลเพกทินด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นเจลเหนียว เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีก การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมาจนเกิด (syneresis) เกิดเจลที่มีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546ก)



ภาพที่ 4 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชัน

ที่มา: Rutenberg (1980)

การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลา ปริมาณ และขนาดของ อะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆในแป้ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ การคืนตัว เกิดได้เร็ว เพราะโมเลกุลอะมิโลสที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ช้า ที่ความเป็นกรด-ด่าง 5-7 จะเกิดการ คืนตัวได้สูงสุด และเกิดได้ลดลงที่ความเป็นกรด-ด่างมากหรือน้อยกว่านี้ ในการชะลอการคืนตัวของ แป้งจะใช้เกลือที่มีประจุบวก (cation) หรือลบแบบประจุเดียว (monovalent anion) และยูเรีย (Collison, 1968; Radley, 1968)

ปริมาณและขนาดของอะมิโลส มีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง อัตราการคืนตัว จะสูงสุดเมื่อโมเลกุลอะมิโลสมีขนาด 100-200 หน่วยกลูโคส อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุล ของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งจำเป็นต้องใช้ อุณหภูมิที่สูงถึง 100-160 องศาเซลเซียส ส่วนอะมิโลเพกทินมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก (Sanders, 1996)

2.3 การใช้ประโยชน์แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังนำมาใช้บริโภคมากที่สุดในครัวเรือน โดยนำมาปรุงอาหารประจำวันในบ้านเรือน หรือร้านค้าทั่วไป นอกจากนี้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมแป้งดัดแปร อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมไม้อัดและกาว ส่วนการใช้แป้งในส่วนอื่นๆ เช่น การผลิตยาเม็ด ผลิตภัณฑ์สัตว์ก็มีปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546ข)

3. การดัดแปรแป้ง

แป้งดัดแปร (modified starch) ความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมี และ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ซึ่งบ่งต่างๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535)

3.1 วัตถุประสงค์ของการดัดแปรแป้ง

การดัดแปรแป้งนั้นมีความจำเป็นเนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัวซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง โดยแป้งดิบในธรรมชาติยังมีข้อจำกัด เช่น ขนาคูปร่าง การพองตัว การเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อได้รับความร้อน แรงเฉือน และมีช่วงความหนืดที่แคบ หากสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเหล่านี้ของแป้งได้ ก็จะสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้มากขึ้น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรแป้งดิบเพื่อให้สมบัติบางประการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลลิตีในเซชัน การกินตัว และการสูญเสียของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ลักษณะเนื้อเจลดีขึ้น (BeMiller, 1997; Light, 1990)

3.2 ประเภทของการดัดแปร

BeMiller (1997) ได้แบ่งการดัดแปรแป้งไว้ 3 กลุ่มดังนี้

3.2.1 การดัดแปรแป้งทางเคมี (chemical modification)

ก. การเกิดอนุพันธ์ (derivatization)

- 1) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งแอซิเตด หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล
- 2) การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิง (cross-linked starch)

ข. การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด

ค. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น แป้งออกซิไดซ์

ง. การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรดเพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น maltodextrin

3.2.2 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification)

ก. เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแป้งจนผ่านขั้นตอนของการเจลาติไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์

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

ค. การลดขนาดแป้งโดยทางกล (ball mill treatment) จะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

3.2.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnological modification)

การดัดแปรด้วยวิธีนี้เป็น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม แป้งดัดแปรในกลุ่มนี้ที่สำคัญ ได้แก่

ก. waxy starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

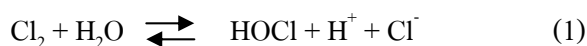
ข. high-amylose starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสสูง

4. โซเดียมไฮโปคลอไรท์

สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl Solution) เป็นของเหลวใสสีเหลือง ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายที่ความเข้มข้นสูง มีครึ่งชีวิต 60-1700 วัน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย ปลอดภัยในการใช้งานแต่ต้องใช้ในปริมาณมาก จึงต้องมีพื้นที่ในการเก็บรักษา สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในสระว่ายน้ำ โรงงานใช้เป็นสารฟอกขาวในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และผลิตเยื่อ และใช้ในขบวนการบำบัดน้ำเสีย

4.1 คลอรีน

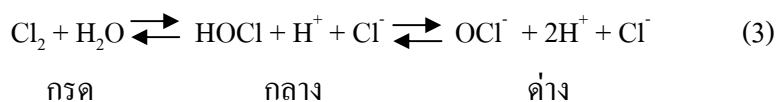
คลอรีน (Cl_2) เมื่ออยู่ในสถานะก๊าซจะมีสีเขียวอ่อน สามารถละลายน้ำได้ และเกิดกรดไฮโปคลอรัส ดังสมการ (1)



กรดไฮโปคลอรัสจะแตกตัวต่อไปได้อีกเป็นไฮโปคลอไรท์อออน ดังสมการ (2)

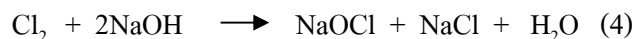


ประสิทธิภาพในการทำงานของสารประกอบคลอรีน ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมี ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปได้ตามสภาวะต่างๆ ที่เปลี่ยนไป เช่น ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยในสภาวะที่ความเป็นกรด-ด่างมาก กรดไฮโปคลอรัสจะแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรท์อออน (OCl^-) เมื่อความเป็นกรด-ด่างน้อย กรดไฮโปคลอรัสจะเปลี่ยนเป็นคลอรีน ดังสมการ (3)



4.2 การเตรียมโซเดียมไฮโปคลอไรท์

การเตรียมโซเดียมไฮโปคลอไรท์ทำได้โดย เติมแก๊สคลอรีนอย่างช้าๆ ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เย็น ดังสมการ (4)



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน(+24,650 แคลอรี) ซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิระหว่างการผลิตให้ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เตรียมได้ เฉพาะในรูปของสารละลายเท่านั้น ซึ่งสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้งได้ทันที ดังสมการ (5) ไม่สามารถเตรียมในสภาพของแข็งได้ เพราะไม่เสถียร สารละลายไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตได้โดยทั่วไปจะมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ 5-10 % และมีความเป็นด่างเล็กน้อย



5. การดัดแปรแป้งโดยวิธีออกซิเดชัน

การดัดแปร โดยวิธีออกซิเดชันเป็นการทำปฏิกิริยาของแป้งกับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ และขนาดของโมเลกุลแป้งเปลี่ยนไป ได้แป้งดัดแปรที่เรียกว่าแป้งออกซิไดซ์ ซึ่งในทางการค้าจะใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์เป็นสารออกซิไดซ์

5.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา

การออกซิไดซ์แป้งแบบสุ่มมี 4 วิธี (Wurzburg, 1986)

5.1.1 ทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง aldehydic reducing (C_1) กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล

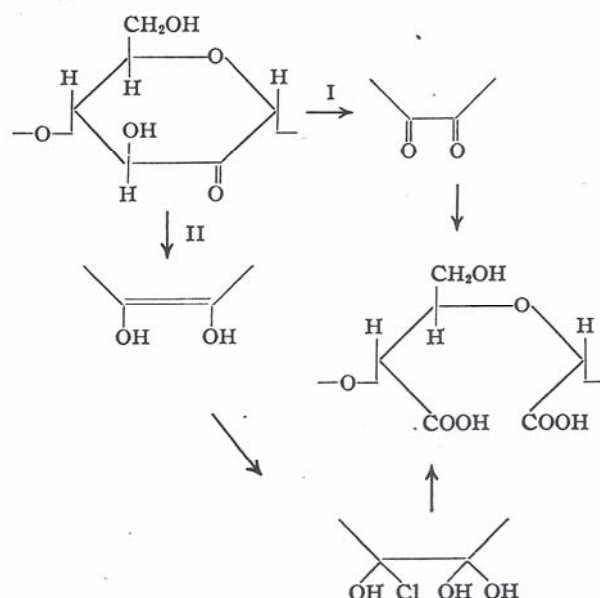
5.1.2 ปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง primary hydroxyl (C_6) กลายเป็นคาร์บอกซิลในรูป

Uronic acid

5.1.3 ปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง secondary hydroxyl (C_2 , C_3 และ C_4) กลายเป็นหมู่คีโตน

5.1.4 ปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง C_2 และ C_3 ซึ่งอยู่ในรูปหมู่ไกลคอล แล้วถูกออกซิไดซ์ โดยการตัดของพันธะระหว่าง C_2 และ C_3 ซึ่งอยู่ในรูป aldehydic กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิล

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอะมิโดเพกทินของแป้ง การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่วนมากจะเกิดที่คาร์บอนตำแหน่ง 2 และ 3 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ/หรือคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอนิล และเมื่อเกิดปฏิกิริยาต่อพันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 เกิดเป็น dialdehyde starch จากนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรท์จะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนที่ 2 และ 3 แตกออกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับแป้งได้ dicarboxyl starch (Whistler and Schweiger, 1957)



ภาพที่ 5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

ที่มา: Whistler and Schweiger (1957)

5.2 สภาพะในกระบวนการผลิต

โดยทั่วไปสมบัติของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ที่สำคัญได้แก่ ชนิดของแป้ง ชนิดของสารออกซิไดซ์ และสภาพที่ใช้ในกระบวนการผลิต

5.2.1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์

การผลิตแป้งออกซิไดซ์ทำได้โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ลงในสารละลายแป้ง ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ใช้วัดเป็น % available chlorine ต่อน้ำหนักแป้ง โดยทั่วไป % available chlorine ในแป้งสูงสุดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 5-6% (Wurzburg, 1986) หากสภาวะการทดลองที่เหมือนกันแล้วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เพิ่มขึ้นแป้งก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น Hullinger and Whistler (1951) ศึกษาผลของการออกซิไดซ์อะมิโลสด้วยสารไฮโปคลอไรท์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ในสภาวะที่เป็นกลาง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโปคลอไรท์จะทำให้ความหนืดและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลสลดลง และจะมีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น

Whistler *et al.* (1956) ศึกษาการออกซิเดชันอะมิโลสของแป้งข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เท่ากับ 0.5-2 equivalent ต่อ AGU ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 และ 11 พบว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้มากขึ้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เพิ่มขึ้น ตั้งแต่มากจากปริมาณกรด glyoxylic มีค่ามากขึ้นแสดงว่าแป้งข้าวโพดออกซิไดซ์มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลในโมเลกุลเพิ่มขึ้น

Scallet and Sowell (1967) ศึกษาลักษณะของเม็ดแป้งออกซิไดซ์ โดยการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าลักษณะภายนอกของเม็ดแป้งจะมีรอยแตก (fragmentation) และรอยแยก (fissures) เป็นแนวรัศมี ซึ่งจะมีมากขึ้นตามการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชัน

Rutenberg and Solarek (1984) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งสาลีออกซิไดซ์เมื่อส่องด้วยกล้อง SEM ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 8

Boruch (1985) ทำการออกซิไดซ์แป้งมันฝรั่ง ซึ่งมี 3 กลุ่มตามขนาดของเม็ดแป้ง ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 10 ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.5 พบว่าแป้งที่มีขนาดเม็ดใหญ่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่าแป้งที่มีขนาดเม็ดเล็กโดยให้ปริมาณกรดคลอโรนิกร้อยละ 75 และ กรดคลอโรนิกร้อยละ 25 ของปริมาณหมู่คาร์บอกซิล และเกิดการตัดโมเลกุลแป้ง ซึ่งบ่งชี้ด้วยปริมาณรีดิวซิงเพิ่มขึ้นและความหนืดลดลง เมื่อดูลักษณะเม็ดแป้งด้วยกล้อง SEM พบรอยแตก (crack) และมีบางส่วนละลายบนผิวเม็ดแป้ง

Hebeish *et al.* (1989) ทดลองนำแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (ร้อยละ 1.5-9) ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 เกิดเป็นแป้งออกซิไดซ์ เมื่อนำมาตรวจสอบปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและสมบัติกระแสวิทยา (rheological properties) พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ และพบในแป้งข้าวน้อยกว่าแป้งข้าวโพด แป้งเปียกของแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดก่อนและหลังการออกซิไดซ์มีพฤติกรรมแบบ non-newtonian thixotropic ความหนืดลดลงเมื่อความเข้มข้นของไฮโปคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยแป้งข้าวมีความหนืดมากกว่าแป้งข้าวโพด

Forssell *et al.* (1995) ได้ทดลองเตรียมแป้งออกซิไดซ์จากแป้ง 2 ชนิด คือ แป้งบาร์เลย์และแป้งมันฝรั่ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ และตรวจสอบลักษณะทางเคมีกายภาพเปรียบเทียบกัน พบว่าที่ภาวะการออกซิไดซ์เดียวกันแป้งข้าวบาร์เลย์ถูกออกซิไดซ์ยากกว่าแป้งมันฝรั่ง โดยในระหว่างการออกซิเดชันโมเลกุลอะมิโดสและอะมิโนเพกทินของแป้งทั้งสองชนิดถูกตัดให้มีขนาดสั้นลง ความหนืดของแป้งทั้งสองลดลงเมื่อความเข้มข้นของไฮโปคลอไรท์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระดับการออกซิเดชันให้สูงขึ้น พบว่าความสามารถในการเกิดเจลของแป้งมันฝรั่งลดลงและการเกิดเจลจะช้ากว่าแป้งบาร์เลย์อย่างมาก นอกจากนี้เจลของแป้งมันฝรั่งออกซิไดซ์ยังมีลักษณะอ่อนแอกว่าเจลของแป้งบาร์เลย์ออกซิไดซ์อีกด้วย

Chattopadhyay *et al.* (1997) ได้ทดลองเตรียมแป้งข้าวโพดและแป้ง amaranth ออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ระดับความเข้มข้น 0.025-0.25 กรัม/กรัมแป้ง ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.5 พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและปริมาณการใช้คลอรีนในการทำปฏิกิริยาแปรผันตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพบในแป้งทั้งสองชนิด ส่วนผลผลิตที่ได้มีปริมาณลดลง

Han and Ahn (1997) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่ระดับร้อยละ 0.75-4.5 ต่อกลไกการออกซิเดชัน พบว่าอัตราการออกซิเดชันขึ้นกับความเข้มข้น ดังนี้ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.75-3 เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 3.75-4.5 เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ค่าคงที่ของอัตราเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ เพิ่มขึ้น

Chung *et al.* (1998) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว ออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นร้อยละ 0-6 ในสภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 นาน 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอกซิล ความสามารถในการละลายและการพองตัวเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันความขาวและความหนืดลดลง ลักษณะพื้นผิวของเม็ดแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อส่องด้วยกล้อง SEM เห็นเป็นผิวขรุขระ

Kuakpetoon and Wang (2001) ศึกษาลักษณะของแป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพดและ แป้งข้าวที่ถูกรักษาด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นร้อยละ 0.8 และ 2 พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและคาร์บอนิลของแป้งออกซิไดซ์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮโปคลอไรท์เพิ่มขึ้น โดยแป้งมันฝรั่งมีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลมากที่สุด โดยทั่วไป การออกซิเดชันทำให้ความหนืดของแป้งลดลง แต่ในกรณีของแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดที่ ถูกรักษาด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นร้อยละ 0.8 พบว่าแป้งคัดแปรมี ความหนืดสูงสุดมากกว่าแป้งดิบ นอกจากนี้จากการตรวจสอบลักษณะโมเลกุลของแป้งด้วย High Performance Size Exclusion Chromatography พบว่าทั้งอะมิโลสและอะมิโลเพกทินถูกย่อยให้มี ขนาดโมเลกุลสั้นลงในระหว่างการออกซิเดชัน

Li and Vasanathan (2003) ศึกษาผลของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ความ เข้มข้นร้อยละ 0.89-3.25 ต่อสมบัติของแป้งถั่วโดยเตรียมแป้งในสภาวะอุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส พบว่าแป้งคัดแปรรที่เตรียมได้ มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลร้อยละ 0.02-0.38 ขณะที่หมู่คาร์บอนิลมีค่า ร้อยละ 0.06-0.19 ผลผลิตแป้งที่เตรียมได้และความหนืดมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่เพิ่มขึ้น

Wang and Wang (2003) ศึกษาแป้งออกซิไดซ์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวซึ่งทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ระดับแอกทิฟคลอรีนในช่วงร้อยละ 0.25-3.00 พบว่าโดยทั่วไปแป้งข้าวโพดออกซิไดซ์มีหมู่คาร์บอกซิลสูงกว่าแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวออกซิไดซ์ แต่มีหมู่คาร์บอนิลใกล้เคียงกัน ซึ่งหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลจะสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยากับน้ำและการพองตัวของแป้ง จากการตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลลิตินเซชันซึ่งใช้เครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimeter) พบว่า อุณหภูมิการเกิดเจลลิตินเซชันของแป้งออกซิไดซ์เพิ่มขึ้นแต่พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินเซชันไม่เปลี่ยนแปลง และความหนืดของแป้งในระหว่างการเกิดเจลลิตินเซชันจะแปรเปลี่ยนไปตามระดับการออกซิไดซ์ ซึ่งวัดโดย Micro Viscoamylograph พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของคลอรีนต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 1) จะให้แป้งที่มีคุณสมบัติความหนืดสูงสุด (peak viscosities) และความหนืดสุดท้าย (final viscosities) สูงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ระดับความเข้มข้นของคลอรีนสูงขึ้นจะทำให้คุณสมบัติความหนืดดังกล่าวลดต่ำลง นอกจากนี้การออกซิไดซ์ยังมีผลทำให้เกิดการตัดพันธะในโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน โดยอะมิโลสจะว่องไวต่อการถูกออกซิไดซ์มากกว่า

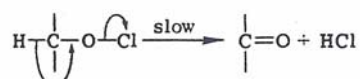
Rivera *et al.* (2005) ตรวจสอบคุณสมบัติของแป้งกล้วยซึ่งถูกออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0.25-2) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9.5 พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล หมู่คาร์บอนิล และความขาวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ระดับสูงขึ้น ความหนืดที่วัดได้ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 0.25-1 มีค่าสูงกว่าแป้งดิบ ขณะที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.25-2 มีความหนืดลดลง

5.2.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

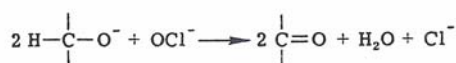
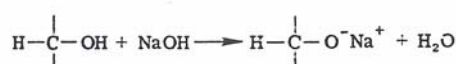
ช่วงความเป็นกรด-ด่างในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันมีความสำคัญเมื่อความเป็นกรด-ด่างต่ำจะเกิดหมู่แอลดีไฮด์ ขณะเดียวกันเมื่อความเป็นกรด-ด่างเป็นกลางจะเกิดหมู่คีโตนและเมื่อความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นจะเกิดหมู่คาร์บอกซิล เพราะหมู่คาร์บอกซิลที่เข้าไปอยู่ในโมเลกุลอะมิโลสมีบทบาทสำคัญในการช่วยลดอัตราการคืนตัวของแป้งเปียก ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจะควบคุมความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วงด่างอ่อนถึงด่างปานกลาง เพื่อจะสามารถเกิดหมู่คาร์บอกซิลได้ (Wurzburg, 1986)

นอกจากนี้ความเป็นกรด-ด่างมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยในสถานะที่เป็นกรดสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์จะเปลี่ยนเป็นคลอรีนอย่างรวดเร็ว แล้วเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมีโปรตรอนเกิดขึ้นจากการเข้าทำปฏิกิริยาดังกล่าว ซึ่งจะทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาลดลง ภายใต้สถานะที่เป็นด่างโมเลกุลแป้งและสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์มีประจุเป็นลบ จึงเกิดการผลักกันทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาเกิดได้ยาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดช้า ส่วนสถานะที่เป็นกลางหรือกรด-ด่างเล็กน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะโมเลกุลของแป้งและสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์มีสภาพเป็นกลาง การเข้าทำปฏิกิริยาของทั้งสองจึงเกิดขึ้นได้ทันที (Rutemberg and Solarek, 1984)

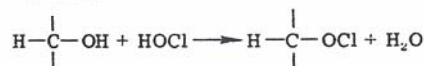
Acid:



Alkaline:



Neutral:



ภาพที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโปคลอไรท์ในสถานะต่างๆ

ที่มา: Rutemberg and Solarek (1984)

Whistler *et al.* (1956) ได้ดัดแปรอะมิโลสของแป้งข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์เท่ากับ 0.5-2 equivalent ต่อ AGU ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 และ 11 แป้งข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรแล้วเมื่อ hydrolyze จะเกิดกรด glyoxylic และ D-erythronic จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดดังกล่าวพบว่า สถานะการดัดแปรที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 จะเกิดได้เร็วและสมบูรณ์กว่าที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11

Whistler and Schweiger (1957) ศึกษาการออกซิเดชันอะมิโนเพกทินของแป้งข้าวโพดด้วยไฮโปคลอไรท์ที่ความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3 - 13 พบว่าการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 หรือ 3 เกิดหมู่คาร์บอนิลขึ้น จากนั้นไฮโปคลอไรท์จะเข้าทำปฏิกิริยาต่อทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 แตกออกและได้แป้งไดคาร์บอกซิลซึ่งตรวจสอบจากปริมาณกรด glyoxylic และ D-erythronic โดยที่ความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 7 เล็กน้อยจะมีปริมาณกรดดังกล่าวมากที่สุด

Schmorak *et al.* (1961) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการออกซิไดซ์แป้งข้าวสาลีด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ โดยควบคุมความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7.5-11.0 ที่ 27 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราของปฏิกิริยาลดลง เมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดยอัตราของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

Schmorak and Lewin (1963) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวสาลีที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ในสภาวะต่างอ่อน (7.5-11) พบว่าที่สภาวะการผลิตที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.5 จะมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลมีค่าสูงสุดที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 และมีการตัดของพันธะกลูโคซิดิกเป็นแบบสุ่ม ซึ่งเกิดขึ้นในส่วน amorphous ของเม็ดแป้ง

Patel *et al.* (1974) ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.5, 7, 5.5 และ 4 ต่อกลไกของการออกซิเดชันแป้งข้าวโพดด้วยไฮโปคลอไรท์ พบว่าอัตราการออกซิไดซ์ของแป้งข้าวโพดสูงสุดที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และมีค่าลดลงเมื่อความเป็นกรดหรือด่างเพิ่มขึ้น

Chattopadhyay *et al.* (1997) ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวโพดและแป้ง amaranth ที่เตรียมในสภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ 0.15 กรัม/กรัมแป้ง เป็นเวลา 120 นาที ความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (7-9) พบว่าปริมาณการใช้คลอรีนในการทำปฏิกิริยาและปริมาณหมู่คาร์บอกซิลของแป้งข้าวโพดมีค่ามากที่สุดที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และแป้ง amaranth ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.5

Han and Ahn (1997) ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างที่ระดับต่างๆ (4, 5, 7 และ 10.5) ต่อลักษณะของแป้งข้าวโพด ซึ่งถูกออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ พบว่า อัตราการออกซิไดซ์สูงที่สุดที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และมีค่าลดลง เมื่อความเป็นกรดหรือด่างเพิ่มขึ้น

5.2.3 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

Boruch (1985) ศึกษาผลของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ต่อแป้งมันฝรั่งขนาดเม็ดต่างๆ โดยใช้ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 10 ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.5 และ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0-180 นาที พบว่าในแป้งมันฝรั่งเม็ดใหญ่ เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความหนืดมีค่าลดลง ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันนี้กับแป้งมันฝรั่งเม็ดเล็ก และมีการออกซิไดซ์เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

Hebeish *et al.* (1989) ทำการวัดอัตราการออกซิเดชันของแป้งข้าวและแป้งข้าวโพด ซึ่งตรวจสอบจากปริมาณการใช้คลอรีนในการทำปฏิกิริยาที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10-120 นาที ผลการทดลองพบว่าแป้งข้าวมีอัตราการออกซิเดชันค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ส่วนแป้งข้าวโพดจะมีอัตราแปรผันตรงกับเวลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5-4.5 แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อัตราการออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และค่อยๆ ช้าลง เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

Chattopadhyay *et al.* (1997) ตรวจสอบผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อแป้งข้าวโพดและแป้ง amaranth ออกซิไดซ์ โดยเตรียมแป้งที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 0.15 กรัม/กรัมแป้ง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60, 90, 120 และ 150 นาที แป้งข้าวโพดและแป้ง amaranth ใช้คลอรีนในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ขณะเดียวกันปริมาณหมู่คาร์บอกซิลในแป้ง amaranth ก็เพิ่มด้วยเช่นกัน แต่เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มเป็น 150 นาที ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลในแป้งข้าวโพดมีค่าลดลง

5.2.4 อุณหภูมิ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ในระหว่างดำเนินปฏิกิริยาจะต้องควบคุมความร้อนที่เพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิในระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาสูงมาก อาจทำให้เม็ดแป้งพองตัวและละลายออกมาบางส่วน ทำให้เกิดการสูญเสียเม็ดแป้งในระหว่างการล้าง โดยทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการทำปฏิกิริยาให้มีค่าไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส (Hullinger, 1964) แม้ว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อเม็ดแป้งในกรณีดังกล่าว แต่ขณะเดียวกันอุณหภูมิเป็นตัวช่วยให้การดำเนินปฏิกิริยาเร็วขึ้น

Schmorak *et al.* (1961) ตรวจสอบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการคัดแปรแป้งข้าวสาลีด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 และ 10 โดยทดลองที่อุณหภูมิ 27, 37 และ 47 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่า ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 มีค่ามากกว่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10

Patel *et al.* (1974) ศึกษาอุณหภูมิของแป้งข้าวโพดที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์โดยประเมินผลในรูปค่าคงที่ของอัตรา ซึ่งปัจจัยที่ทำการทดลองคืออุณหภูมิ 27, 37 และ 47 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4-8.5 พบว่าค่าคงที่ของอัตราแปรผันตามอุณหภูมิและที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 มีค่าสูงสุด

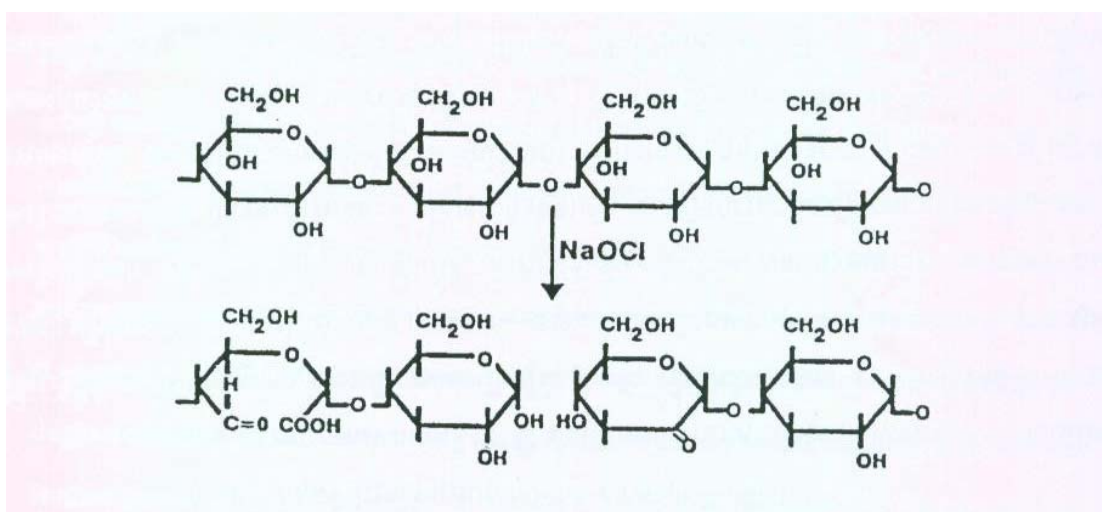
Rutenberg and Solarek (1984) รายงานว่าแป้งออกซิไดซ์เมื่ออยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงจะเกิดสีเหลืองหรือสีน้ำตาลในระหว่างการเก็บ แป้งออกซิไดซ์ซึ่งมีหมู่แอลดีไฮด์จะทำให้แป้งเป็นสีเหลืองได้ หากมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความเหลืองก็จะเพิ่มขึ้น

Chattopadhyay *et al.* (1997) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวโพด และแป้ง amaranth ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.5 พบว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวไม่มีผลต่อปริมาณหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นในโมเลกุลแป้งข้าวโพด สำหรับแป้ง amaranth ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลสูงที่สุดและมีลักษณะฟิล์มที่มีความยืดหยุ่น

Han and Ahn (1997) ได้ทดลองเตรียมแป้งข้าวโพดออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 4, 25 และ 35 องศาเซลเซียส ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น อัตราการออกซิไดซ์จะเพิ่มขึ้น

5.3 สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่แอลดีไฮด์ หมู่คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล และมีการตัดโมเลกุลแป้ง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง และโครงสร้างแป้งเปลี่ยนไป ทำให้เกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้แป้งมีความขาวขึ้น แป้งออกซิไดซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำปฏิกิริยากับคลอรีนในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ไม่เกินร้อยละ 5.5 และมีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลไม่เกินร้อยละ 1.1 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2535)



ภาพที่ 7 โครงสร้างแป้งที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

ที่มา: Mukprasirt (2000)

แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งที่มีประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลแป้ง ทำให้อัตราการคั่นตัวของแป้งเปียกลดลง แป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใช้แป้งเปียกที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ แป้งเปียกมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดแป้งขาวขึ้น กลิ่นดีขึ้น และมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เนื่องจากการฟอกสีของไฮโปคลอไรท์จะ

ไปละลายส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ออกจากแป้ง (Sander, 1996) นอกจากนี้แป้งออกซิไดซ์ยังสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แข็งและใสมากขึ้น มีแนวโน้มในการหดตัวหรือแตกน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งย่อยด้วยกรดหรือจากแป้งดิบ มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า เพราะคุณสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดระหว่างการออกซิไดซ์

5.4 การใช้ประโยชน์

แป้งออกซิไดซ์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม ชุปกึ่งสำเร็จรูป น้ำสลัด มายองเนส อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ เคลือบผิวหน้ากระดาษให้เรียบ และใช้สำหรับเคลือบเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ให้เส้นด้ายลื่นและมีความยืดหยุ่น (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546ก)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแป้งมันสำปะหลังทางการค้าชั้นพิเศษ (Tapioca Starch Premium Grade) จาก บริษัทสงวนวงษ์ อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา

2. สารเคมี

- 2.1 โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite)
- 2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)
- 2.3 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
- 2.4 ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalien)
- 2.5 ไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride)
- 2.6 โซเดียมไบซัลไฟท์ (Sodium bisulfite)
- 2.7 ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate)
- 2.8 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide)
- 2.9 โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate)

โดยสารเคมีที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวอยู่ในระดับ 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 เครื่องควบคุม pH (pH controller, Mettler-Toledo 2100e, Germany)
- 3.6 ปั๊มเติมสาร (Electronic metering pump, Plusatrom C Plus, USA)

- 3.7 เครื่องกวน (Hot plate magnetic stirrer, Snijders analysers 34532, Holland)
- 3.8 เครื่องบดแป้ง (Laboratory mill, Perten 3100, Sweden)
- 3.9 อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิพร้อมเครื่องเขย่า (Shaker waterbath, Polyscience, USA)
- 3.10 เครื่อง rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany)
- 3.11 เครื่องวัดความขาว (KETT Digital Whiteness Meter, Model C-100, Japan)
- 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, Joel JSM 5310, England)
- 3.13 เครื่อง High-Performance Size-Exclusion Chromatography (Shimadzu, Japan)
- 3.14 เครื่อง sonicator (Vibra cellTM, Sonics & Materials Inc., USA)
- 3.15 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic, 2210 Branson, USA)
- 3.16 เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์

วิธีการ

1. การผลิตแป้งออกซีไดซ์โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์

เตรียมแป้งออกซีไดซ์ภายใต้สภาวะมาตรฐาน คัดแปลงจากวิธีของ Kuakpetoon and Wang (2001) ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 40 (โดยน้ำหนัก) ทำการกวนแป้งให้กระจายตัวดี ปรับและควบคุมความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งให้อยู่ในระดับที่ต้องการด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ควบคุมอุณหภูมิของน้ำแป้งในระหว่างการทำปฏิกิริยา เติมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ และกวนน้ำแป้งในสภาวะที่กำหนด เก็บตัวอย่างตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยามาหยุดปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไบซัลไฟท์เพื่อกำจัดแอกทีฟคลอรีนที่เหลืออยู่ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งให้อยู่ระหว่าง 6.0-6.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรองและล้างแป้ง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาผลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อสมบัติของแป้งคัดแปร โดยทำการควบคุมสภาวะในระหว่างการผลิตแป้งดังนี้

1.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างโดยควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งขณะทำปฏิกิริยาให้อยู่ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7, 8, 9, 10 และ 11

1.2 ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ โดยควบคุมปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่เติมลงในน้ำแป้งให้มีปริมาณของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 1, 3 และ 5 (โดยน้ำหนักแป้ง)

1.3 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา โดยควบคุมระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 30, 60, 120 และ 300 นาที

1.4 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำแป้งในระหว่างทำปฏิกิริยาที่ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

2. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งออกซิไดซ์ที่เตรียมได้

2.1 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (ภาคผนวก ข้อ 1)

วิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอนิลตามวิธีของ Wang and Wang (2003) โดยชั่งแป้ง ตัวอย่าง 4 กรัม ละลายน้ำ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในน้ำเดือดเป็นเวลา 20 นาที ปรับความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 3.2 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M แล้วเติมสารละลายไฮดรอกซีลามีนรีเอเจนท์ก่อนนำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการไตเตรทด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M จนกระทั่งความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.2

2.2 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (ภาคผนวก ข้อ 2)

วิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลตามวิธีของ FAO (2001) โดยชั่งแป้งตัวอย่าง 5 กรัม ผสมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน กรองและล้างแป้ง หลังจากนั้นนำแป้งมาละลายในน้ำแล้วนำไปเขย่าในน้ำเดือด 15 นาที และทำการไตเตรทขณะร้อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 M โดยใช้ฟีนอล์ฟทาไลน์เป็นอินดิเคเตอร์

2.3 ความหนืด (ภาคผนวก ข้อ 3)

ทำการตรวจวัดความหนืดของตัวอย่างแป้งด้วยเครื่อง rotational Physica MCR 300 rheometer (Physica Messtechnik, Ostfildern, Germany) ใช้ถ้วยบรรจุตัวอย่างแบบ concentric cylinder และ double gap cylindrical geometry โดยนำสารละลายแป้งในน้ำกลั่น (15 %, w/w) ไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เขย่าพลาสติกในช่วง

5 นาทีแรกเพื่อให้ตัวอย่างเกิดการเจลาติไนเซชันอย่างสม่ำเสมอ เมื่อให้ความร้อนจนครบเวลา นำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำร้อน และเมื่อตัวอย่างเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส จึงทำการตรวจวัดค่าความหนืดที่อัตราแรงเฉือน (shear rate) ระหว่าง $0.1-500 \text{ s}^{-1}$ สำหรับบางตัวอย่างที่ทำการศึกษาสมบัติความคงตัวของความหนืดแป็งเปือกในระหว่างการเก็บรักษานั้น จะนำตัวอย่างแป็งเปือกหลังจากให้ความร้อนแล้วไปบรรจุในภาชนะปิดและเก็บไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำตัวอย่างมาตรวจวัดค่าความหนืดหลังจากเก็บไว้ในสภาวะดังกล่าวเป็นเวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง รายงานผลโดยเปรียบเทียบค่าความหนืดที่อัตราเฉือน 40 s^{-1}

2.4 ความขาว (ภาคผนวก ข้อ 4)

วัดความขาวของแป็งด้วยเครื่อง KETT Digital Whiteness Meter

2.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (ภาคผนวก ข้อ 5)

ตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 3,000 เท่า ตามวิธีของ Walker (1976)

2.6 ขนาดโมเลกุล (ภาคผนวก ข้อ 6)

วิเคราะห์โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดแป็งโดยใช้เครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography ตามวิธีของ Govindasamy *et al.* (1992)

3. การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยวิธีทางสถิติ

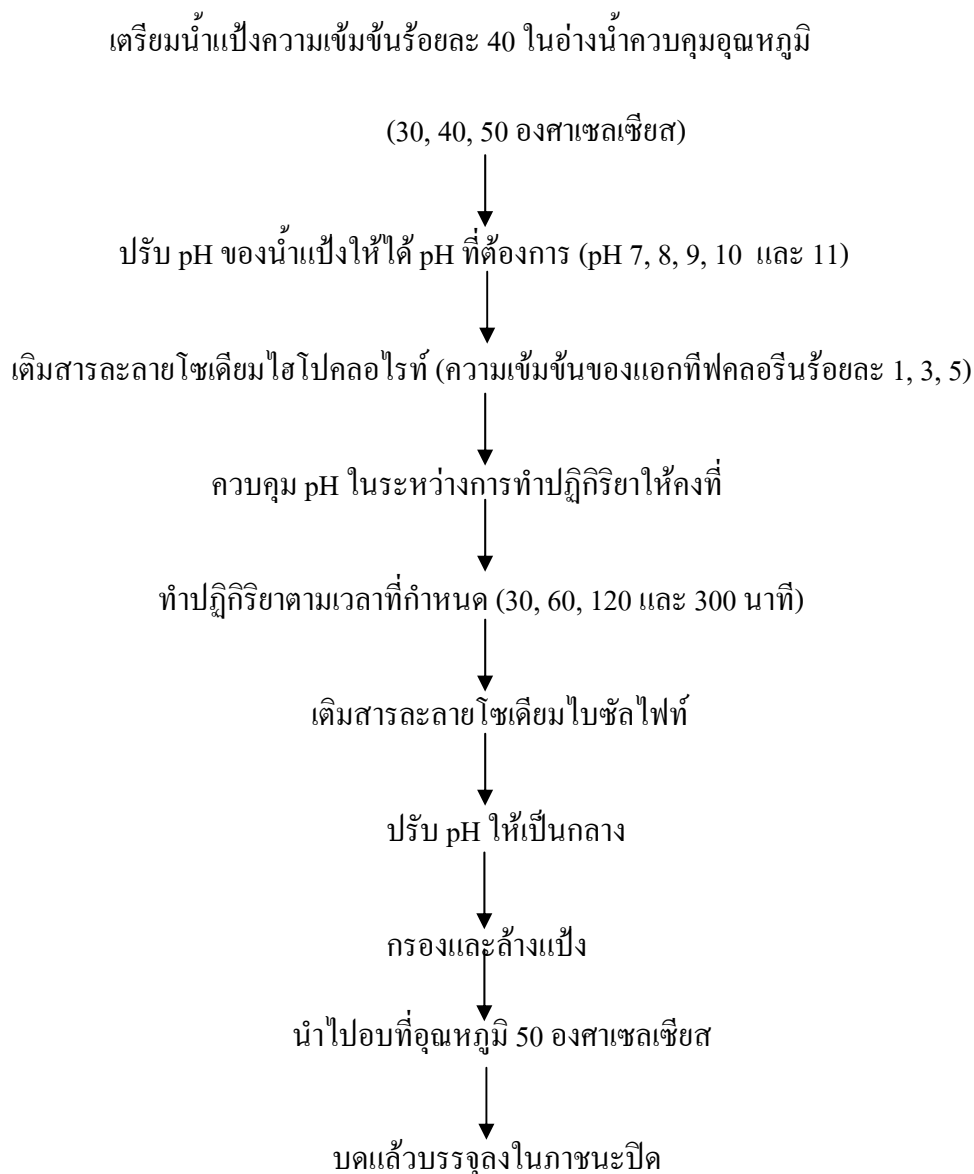
ในการทดลองจัดตั้งทดลองแบบแฟกทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete Randomized Design) และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบัน
คั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ระยะเวลาในการทำวิจัย

ระยะเวลาในการทำวิจัยเริ่มตั้งแต่ตุลาคม 2547 ถึงสิงหาคม 2549



ภาพที่ 8 การเตรียมน้ำเป้งออกซิไดซ์จากเป้งนํ้าสำหรับสกัด

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kuakpetoon and Wang (2001)

ผลและการวิจารณ์

1. ผลของสถานะความเป็นกรด-ด่าง (pH) และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

1.1 ผลของสถานะความเป็นกรด-ด่าง และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้ง

เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังมาผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่มีความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 และแปรค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่างการทำปฏิกิริยาที่ระดับ 7, 8, 9, 10 และ 11 และที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30-300 นาที ได้แป้งออกซิไดซ์ซึ่งมีปริมาณหมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล ความหนืด และความขาวดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตใน
สภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอคติฟ
คลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)^{1,2}

หมู่คาร์บอนิล (ร้อยละ)						
เวลา (นาท)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา					ค่าเฉลี่ย
	7	8	9	10	11	
30	0.350±0.00	0.289±0.06	0.184±0.02	0.119±0.02	0.081±0.01	0.204 ^{NS}
60	0.348±0.03	0.259±0.02	0.183±0.01	0.120±0.04	0.094±0.00	0.200 ^{NS}
120	0.352±0.05	0.247±0.04	0.165±0.03	0.112±0.02	0.098±0.01	0.195 ^{NS}
300	0.356±0.04	0.253±0.03	0.176±0.02	0.119±0.03	0.094±0.01	0.199 ^{NS}
ค่าเฉลี่ย	0.351 ^a	0.262 ^b	0.177 ^c	0.117 ^d	0.092 ^d	

หมู่คาร์บอกซิล (ร้อยละ)					
เวลา (นาท)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
30	0.494±0.03 ^{b,NS}	0.769±0.00 ^{a,NS}	0.739±0.14 ^{a,NS}	0.415±0.01 ^{b,C}	0.331±0.07 ^{b,C}
60	0.520±0.00 ^{bc,NS}	0.793±0.01 ^{a,NS}	0.814±0.07 ^{a,NS}	0.534±0.03 ^{b,BC}	0.432±0.07 ^{b,B}
120	0.490±0.03 ^{bc,NS}	0.814±0.01 ^{a,NS}	0.818±0.06 ^{a,NS}	0.615±0.03 ^{b,AB}	0.564±0.08 ^{bc,AB}
300	0.497±0.00 ^{c,NS}	0.806±0.03 ^{a,NS}	0.838±0.04 ^{a,NS}	0.682±0.05 ^{b,A}	0.579±0.08 ^{c,A}

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์

เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² n.d = not detected (ตัวอย่างเริ่มเป็นเจลอ่อน ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดจึงไม่สามารถ
ตรวจวัดค่าความหนืดได้)

³ แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

ตารางที่ 2 (ต่อ) สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอททีฟคลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)^{1,2}

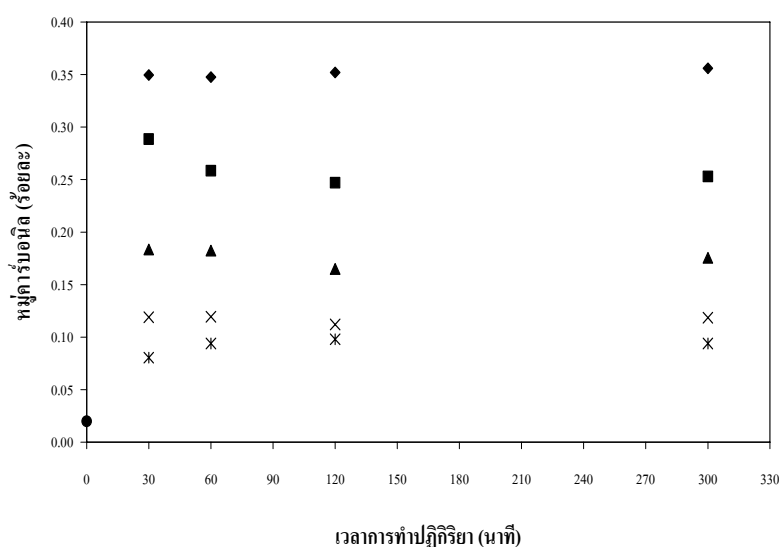
ความหนืด (mPa.s) ³					
เวลา	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
(นาที)	7	8	9	10	11
30	27.11±0.89 ^{c,A}	87.26±13.09 ^{b,A}	1757.00±186.24 ^{a,A}	n.d	n.d
60	26.63±1.82 ^{b,A}	54.95±7.22 ^{b,B}	1300.00±68.90 ^{a,B}	75.02±10.77 ^{b,A}	61.02±8.02 ^{b,A}
120	20.95±0.47 ^{b,B}	31.80±0.75 ^{b,BC}	315.00±47.25 ^{a,C}	29.61±2.96 ^{b,B}	19.84±2.58 ^{b,B}
300	14.04±1.12 ^{bc,C}	21.41±1.07 ^{b,C}	60.63±4.24 ^{a,C}	20.35±1.18 ^{bc,B}	13.00±0.39 ^{c,B}
ความขาว (Kett scale)					
เวลา	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
(นาที)	7	8	9	10	11
30	96.65 ±0.50 ^{b,NS}	97.30±0.85 ^{ab,NS}	98.10±0.00 ^{a,NS}	98.00±0.42 ^{a,NS}	98.55±0.21 ^{a,C}
60	96.00 ±0.14 ^{b,NS}	96.68±0.53 ^{b,NS}	98.65±0.07 ^{a,NS}	98.70±0.71 ^{a,NS}	99.15±0.07 ^{a,B}
120	95.63 ±0.60 ^{b,NS}	96.50±0.28 ^{b,NS}	98.65±0.07 ^{a,NS}	99.20±0.85 ^{a,NS}	99.40±0.14 ^{a,AB}
300	95.13 ±0.32 ^{b,NS}	96.05±0.92 ^{b,NS}	98.83±0.38 ^{a,NS}	99.60±0.28 ^{a,NS}	99.85 ±0.07 ^{a,A}

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² n.d = not detected (ตัวอย่างเริ่มเป็นเจลอ่อน ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดจึงไม่สามารถตรวจวัดค่าความหนืดได้)

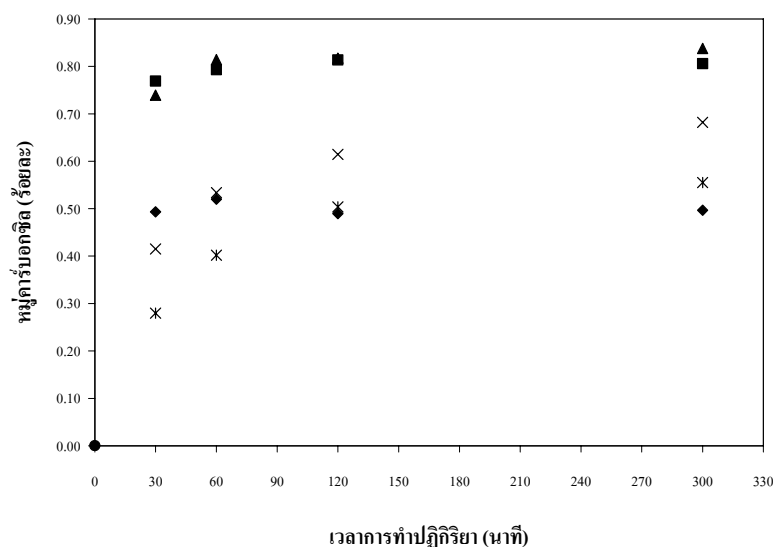
³ แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

ในการตัดแปรแป้งด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ จะมีการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลแป้งไปเป็นหมู่คาร์บอเนลและคาร์บอกซิลตามลำดับ โดยสถานะของปฏิกิริยาถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่เกิดขึ้นในโมเลกุลแป้ง จากการวิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอเนลในแป้งตัดแปร พบว่าแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตภายใต้สถานะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 และเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30-300 นาที มีปริมาณหมู่คาร์บอเนลอยู่ในช่วงร้อยละ 0.081-0.356 (ตารางที่ 2) ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณหมู่คาร์บอเนลของแป้งมันสำปะหลังดิบซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.02 จากผลการทดลองจะเห็นว่า สถานะของการตัดแปรแป้งที่มีหมู่คาร์บอเนลเกิดมากที่สุดได้แก่ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ขณะเดียวกันเมื่อมีการควบคุมสถานะของการผลิตให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ปริมาณหมู่คาร์บอเนลในโมเลกุลแป้งตัดแปรที่ผลิตได้จะมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่คาร์บอเนล พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอเนลที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นกับเวลาการทำปฏิกิริยา ปริมาณหมู่คาร์บอเนลมีความคงที่ตลอดเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30 ถึง 300 นาที (ภาพที่ 9)



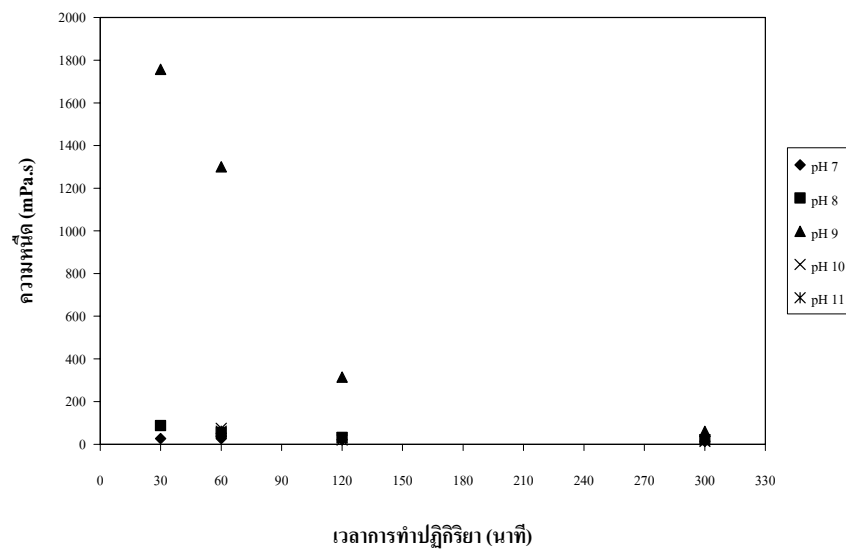
ภาพที่ 9 ปริมาณหมู่คาร์บอเนลของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอททิฟคลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณหมู่คาร์บอกซิลในตัวอย่างเป็ง พบว่าเป็งมันสำปะหลังดิบไม่มีหมู่คาร์บอกซิลเลย ในขณะที่เป็งที่ผ่านการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นอย่างมาก คืออยู่ในช่วงร้อยละ 0.331-0.838 (ตารางที่ 2) โดยสภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 และ 9 จะให้เป็งที่มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลสูงที่สุด สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7, 10 และ 11 จะให้เป็งดัดแปรที่มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลที่น้อยลง สำหรับผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณหมู่คาร์บอกซิลนั้นจะเห็นว่ามีแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาวะความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการผลิตเป็งดัดแปร กล่าวคือ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30-300 นาทีไม่มีผลต่อปริมาณหมู่คาร์บอกซิลของเป็งออกซิไดซ์ที่ผลิตภายใต้สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ 7, 8 และ 9 อย่างไรก็ตามที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่สูงขึ้น (ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11) ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น และเริ่มมีค่าคงที่ที่เวลา 120 นาที (ตารางที่ 2 และภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลของเป็งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอทฟลอรินร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

ในระหว่างการออกซิเดชันแป้งด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ นอกจากจะมีการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลไปเป็นหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลแล้ว สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ยังสามารถทำลายพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลแป้ง ทำให้แป้งมีขนาดโมเลกุลสั้นลง ส่งผลให้ความหนืดของแป้งออกซิไดซ์ลดลงด้วย (Kuakpetoon and Wang, 2001) ซึ่งจากการตรวจวัดความหนืดของตัวอย่างแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในงานวิจัยนี้ พบว่าได้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ทุกตัวอย่างของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตขึ้นมีความหนืดลดลงเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบที่ความเข้มข้นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ไรก็ดีในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดเพื่อเปรียบเทียบความหนืดของตัวอย่างแป้งต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าสูงเกินกว่าที่จะเตรียมแป้งเปียกจากแป้งมันสำปะหลังดิบจึงไม่สามารถวัดค่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบได้ เมื่อพิจารณาผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งคัดแปร (พิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะที่เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่าง 60-300 นาที เนื่องจากตัวอย่างแป้งคัดแปรที่ผลิตด้วยเวลา 30 นาที ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 เริ่มเกาะตัวเป็นเจลอ่อน (weak gel) ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดค่าความหนืด (ที่ 50 องศาเซลเซียส) จึงไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าความหนืดได้) จะเห็นว่าที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 แป้งคัดแปรที่ผลิตได้มีค่าความหนืดสูงที่สุด ในขณะที่เมื่อสภาวะความเป็นกรด-ด่างสูงหรือต่ำกว่านี้ จะผลิตได้แป้งคัดแปรที่มีความหนืดลดลงตามลำดับ โดยที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 จะให้แป้งคัดแปรที่มีความหนืดต่ำที่สุด (ดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 11) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งคัดแปรดังกล่าวน่าจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลของแป้งคัดแปร สภาวะที่ผลิตได้แป้งคัดแปรที่มีความหนืดต่ำน่าจะมีปฏิกิริยาของการลดขนาดโมเลกุลของแป้งเกิดได้มาก และในทางกลับกันในกรณีของแป้งคัดแปรที่ยังคงมีความหนืดค่อนข้างสูง น่าจะมีอัตราของการลดขนาดโมเลกุลของแป้งเกิดได้น้อยกว่า ซึ่งผลของการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลแป้งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป สำหรับผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติด้านความหนืด พบว่าแป้งคัดแปรที่ผลิตได้มีความหนืดลดลงตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น โดยที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 จะมีอัตราการลดลงของความหนืดระหว่างการทำปฏิกิริยา 30-300 นาทีมากที่สุด (จากความหนืด 1,757 เป็น 60.63 mPa.s) ในขณะที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างช่วงเวลาดังกล่าวน้อยที่สุด (จากความหนืด 27.11 เป็น 14.04 mPa.s) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการลดค่าความหนืดของแป้งคัดแปรที่ผลิตภายใต้สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 มีอัตราค่อนข้างเร็วและส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายใน 30 นาทีแรกของการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 11 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอททีฟคลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

แป้งออกซิไดซ์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษ ในอุตสาหกรรมต้องการแป้งที่เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป หรือนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์แล้วได้เจลที่ใสและไม่เกิดการคืนตัว แต่แป้งที่เกิดการเจลาทิไนเซชันแล้วเมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงมักจะเกิดเจลที่มีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่างแหสามมิติขึ้น โดยโมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเข้ามาจับกันหรือจับกับอะมิโลเพกทินด้วยพันธะไฮโดรเจน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวิเคราะห์ความคงตัวของความหนืดแป้งเปียกในระหว่างการเก็บรักษาเพื่อติดตามแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งโดยเมื่อนำแป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์ที่เตรียมขึ้นที่สภาวะของการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30-300 นาที) มาตรวจวัดค่าความหนืดในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3

จากผลการทดลองจะเห็นว่าพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความหนืดแป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกัน โดยกลุ่มที่ 1 ได้แก่ แป้งที่ผลิตในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-9 โดยแป้งเปียกจะมีความหนืดลดลงตามเวลาการเก็บที่นานขึ้น ในขณะที่กลุ่มที่ 2 ได้แก่ แป้งที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 โดยแป้งเปียกมีแนวโน้มที่จะมีความหนืดสูงขึ้นตามเวลาการเก็บที่นานขึ้น เพื่อให้สะดวกในการเปรียบเทียบความคงตัวของความหนืดแป้งเปียก จึงได้ทำการคำนวณอัตราส่วนของความหนืดแป้งเปียกหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อความหนืดแป้งเปียกเริ่มต้น (ความหนืดที่ 8 ชั่วโมง / ความหนืดที่ 0 ชั่วโมง) โดยแป้งที่มีความคงตัวสูงจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเกิดขึ้น และควรมีค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 1 ค่าที่สูงกว่า 1 แสดงว่าแป้งเปียกมีความหนืดสูงขึ้นระหว่างการเก็บรักษา ในทางกลับกันค่าที่น้อยกว่า 1 แสดงว่า แป้งเปียกมีความหนืดลดลงระหว่างการเก็บรักษา

เมื่อพิจารณาแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 จะเห็นว่า มีแนวโน้มที่แป้งเปียกจะมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแป้ง โดยอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการผลิต แป้งคัดแปร ที่เวลาการผลิตเดียวกันพบว่า แป้งที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 จะมีอัตราการเพิ่มของความหนืดแป้งเปียกสูงกว่าแป้งที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในโมเลกุลแป้ง (ตารางที่ 2) จะเห็นว่าในสภาวะของ

การผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 จะมีการสร้างหมู่คาร์บอกซิลเป็นหลัก (ประมาณร้อยละ 0.331-0.682) และมีหมู่คาร์บอนิลเกิดน้อยมาก (ร้อยละ 0.081-0.120) นอกจากนี้จะเห็นว่าที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 มีปริมาณคาร์บอกซิลสูงกว่าที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 ดังนั้นการที่แป้งผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 มีความคงตัวสูงกว่าแป้งที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 น่าจะมีผลมาจากหมู่คาร์บอกซิลในโมเลกุลแป้งช่วยทำหน้าที่ป้องกันการกลับมาจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้ง จึงช่วยลดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันลงได้ เมื่อพิจารณาผลของเวลาการทำปฏิกิริยา จะเห็นว่าแป้งเปียกมีความคงตัวของความหนืดสูงขึ้นตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับปริมาณหมู่คาร์บอกซิลที่สูงขึ้นตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นด้วย

ในกรณีของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-9 ความหนืดแป้งเปียกมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการเก็บรักษา การลดของความหนืดจะพบมากที่สุดในการหมักของแป้งคัดแปรที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 และน้อยลงที่ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของพฤติกรรมดังกล่าวยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่โดยทั่วไปความหนืดมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุล การลดความหนืดของแป้งดังกล่าวอาจเนื่องมาจากการลดขนาดโมเลกุลแป้งเกิดขึ้นในระหว่างการรักษาแป้งเปียก ทั้งนี้ได้เคยมีการรายงานการเกิด hydrolysis ของโมเลกุลแป้งไดอัลคิไซด์ที่อยู่ในสภาพแป้งเปียก (Veelaert *et al.*, 1997) โดยแป้งไดอัลคิไซด์เป็นแป้งออกซิไดซ์ชนิดหนึ่ง เตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาของแป้งกับสาร periodate ทำให้เกิดหมู่ไดอัลคิไซด์ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 (C-2 และ C-3) ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้รายงานว่าแป้งไดอัลคิไซด์ที่อยู่ในสภาพแป้งเปียกมีความหนืดลดลงตามเวลาที่นานขึ้น โดยการลดความหนืดมีผลมาจากการเกิด hydrolysis ของโมเลกุลแป้งทำให้โมเลกุลแป้งมีขนาดสั้นลง โดยคณะผู้วิจัยได้อธิบายว่าการเกิด hydrolysis ของแป้งไดอัลคิไซด์อาจมีผลเนื่องมาจาก Cannizzaro reaction และ/หรือ β - elimination จากผลงานวิจัยดังกล่าวอาจสันนิษฐานได้ว่า การลดความหนืดแป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์ที่คัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-9 อาจมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่รายงานในกรณีของแป้งไดอัลคิไซด์

ตารางที่ 3 ความหนืดแป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์ (เตรียมในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ) ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส^{1,2,3}

ความหนืด (mPa.s)						
pH	เวลา (นาที)	เวลาการเก็บรักษา (ชั่วโมง)				การเปลี่ยนแปลง ความหนืด ⁴
		0	2	4	8	
7	30	27.11±0.89 ^a	25.39±0.20 ^{ab}	23.52±0.1.71 ^{ab}	21.69±1.24 ^b	0.80
	60	26.63±1.82 ^a	25.07±0.17 ^{ab}	23.61 ±1.36 ^{ab}	21.22±1.09 ^b	0.80
	120	20.95±0.47 ^a	20.58±0.20 ^a	19.70±0.48 ^a	18.21±0.93 ^a	0.87
	300	14.04±1.12 ^a	14.01 ±0.42 ^a	13.77±0.71 ^a	13.16±0.11 ^a	0.94
8	30	87.26±3.04 ^a	62.63±3.69 ^{bc}	54.53±0.96 ^{cd}	45.78±1.09 ^d	0.52
	60	54.95±2.69 ^a	50.97±1.12 ^{ab}	45.93±1.68 ^{bc}	39.17±2.01 ^c	0.71
	120	31.80±2.91 ^a	31.27±1.22 ^a	29.36 ±1.73 ^a	27.79±1.16 ^a	0.87
	300	21.41 ±1.23 ^a	21.94±1.73 ^a	21.63±0.82 ^a	20.83±0.83 ^a	0.97
9	30	1757.00±168.15 ^a	1473.00±85.43 ^a	1325.00±56.84 ^a	800.00±73.60 ^b	0.45
	60	1300.00±186.55 ^a	1379.00±135.14 ^a	997.00 ±39.39 ^{ab}	579.00±48.47 ^b	0.45
	120	315.00±40.32 ^a	268.00±25.19 ^{ab}	200.00±13.80 ^{bc}	122.00±9.04 ^c	0.39
	300	60.63 ±2.29 ^a	56.27 ±1.99 ^a	57.85±2.88 ^a	52.61±2.77 ^a	0.87
10	30	n.d	n.d	n.d	n.d	-
	60	75.02±4.64 ^b	84.34±3.10 ^{ab}	85.21±5.25 ^{ab}	90.02±8.23 ^a	1.20
	120	29.61±1.09 ^b	33.36±1.06 ^{ab}	33.71±0.95 ^{ab}	35.27±1.30 ^a	1.19
	300	20.35±1.58 ^a	22.01±0.47 ^a	22.38±0.79 ^a	23.22±1.20 ^a	1.14
11	30	n.d	n.d	n.d	n.d	-
	60	61.02±3.48 ^c	129.50±9.63 ^c	253.40±20.55 ^b	479.50±54.66 ^a	7.86
	120	19.84±1.40 ^b	22.75±0.95 ^{ab}	24.21 ±1.39 ^{ab}	27.28±0.85 ^a	1.38
	300	13.00±0.13 ^a	14.35±0.27 ^a	14.85±0.74 ^a	15.44±1.19 ^a	1.19

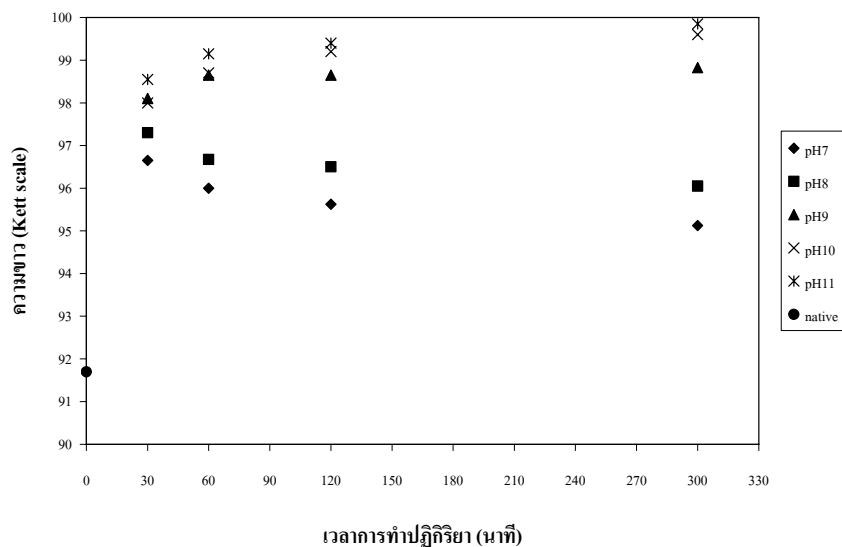
หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

² n.d = not detected (ตัวอย่างเริ่มเป็นเจลอ่อน ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดจึงไม่สามารถตรวจวัดค่าความหนืดได้)

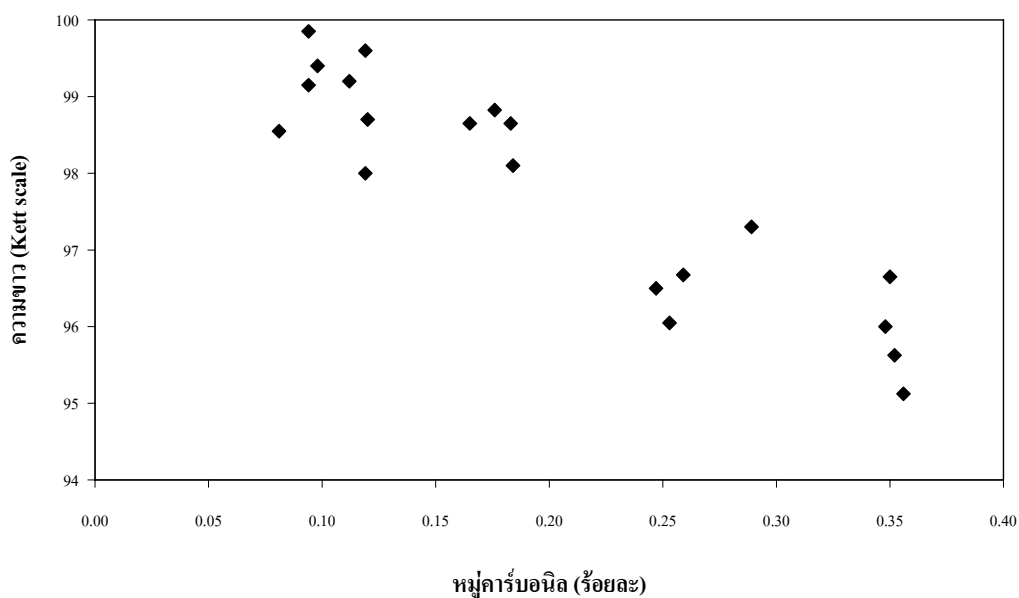
³ แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

⁴ แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดโดยคำนวณจากอัตราส่วนของความหนืดแป้งเปียกหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อความหนืดแป้งเปียกเริ่มต้น

จากการนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง ทั้ง 5 ระดับ มาวัดความขาว พบว่าทุกตัวอย่างของแป้งที่ผ่านการออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ จะมีความขาวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับความขาวของแป้งมันสำปะหลังดิบ (แป้งออกซิไดซ์มีค่าความขาวประมาณ 95.13-99.85 ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดิบมีความขาวเท่ากับ 91.70) เนื่องจากโซเดียมไฮโปคลอไรท์มีสมบัติเป็นสารฟอกขาว (bleaching agent) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาและละลายส่วนที่ไม่บริสุทธิ์และสารให้สีออกจากแป้งได้ (Sanders, 1996) เมื่อทำการตรวจวัดความขาวของตัวอย่างแป้งด้วยเครื่อง Whiteness พบว่าความขาวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เวลาเดียวกัน จะมีค่าความขาวเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดยแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9-11 มีความขาวมากกว่าที่ผลิตในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-8 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2 และภาพที่ 12) การที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการผลิตมีผลต่อค่าความขาวของเม็ดแป้งดัดแปรที่ผลิตได้อาจเนื่องมาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้แป้งออกซิไดซ์มีโครงสร้างหรือหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สมบัติแป้งในตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าความขาวมีความสัมพันธ์กับปริมาณหมู่คาร์บอนิลแบบผกผัน กล่าวคือ ในสภาวะที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลมากจะให้แป้งออกซิไดซ์ที่มีค่าความขาวน้อย แต่ในสภาวะที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลน้อยจะให้แป้งดัดแปรที่มีค่าความขาวสูง (ดังแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 13) ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ Rutenberg and Solarek (1984) ซึ่งพบว่าหมู่แอลดีไฮด์มีผลต่อความขาวของแป้ง โดยถ้ามีปริมาณมากความขาวของแป้งก็จะลดลง



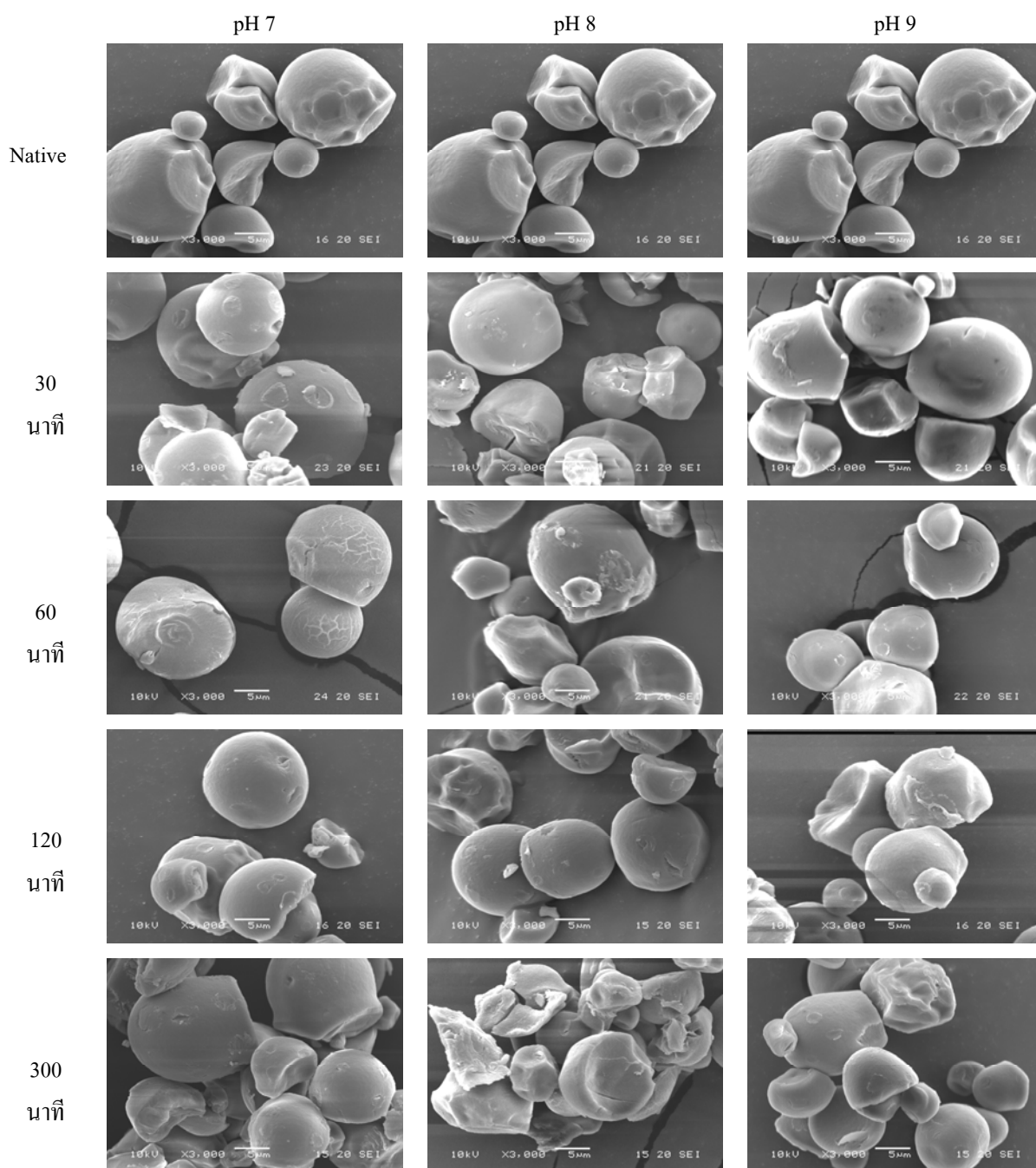
ภาพที่ 12 ความขาวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)



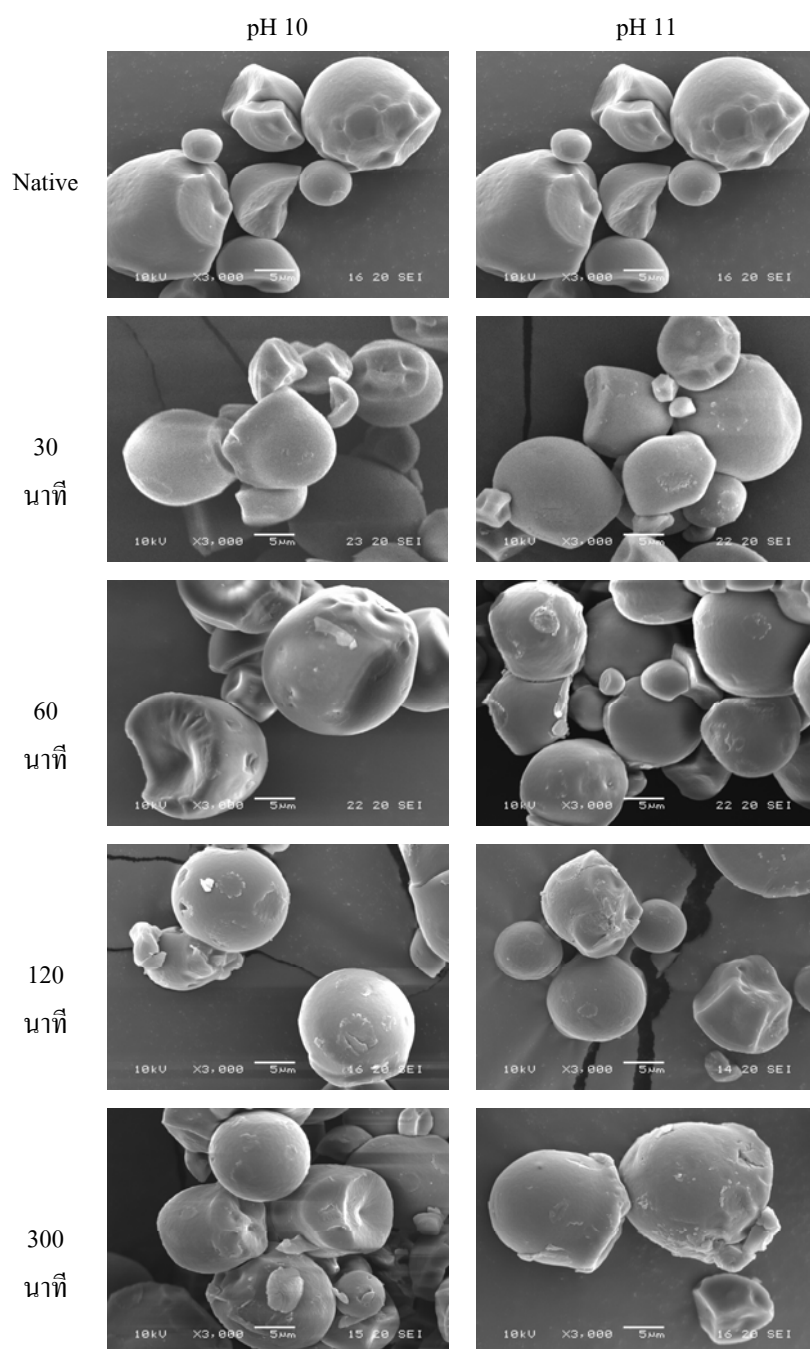
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวกับปริมาณหมู่คาร์บอนิลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

1.2 ผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และเวลาการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติทางโครงสร้างของแป้ง

เมื่อนำตัวอย่างแป้งดัดแปรที่ผลิตได้มาศึกษาพื้นผิวของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 3,000 เท่า เพื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ พบว่าลักษณะภายนอกของแป้งมันสำปะหลังดิบมีลักษณะพื้นผิวเรียบเป็นรูปไข่ที่ปลายด้านหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าด้านใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ และแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจน ในขณะที่เม็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่สภาวะการผลิตต่างๆ (ภาพที่ 14) มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ ยังคงรูปร่างเดิมของเม็ดแป้ง แต่มีพื้นผิวเป็นรอยแตก และรอยแยก ผิวมีลักษณะไม่เรียบ ทั้งนี้ระดับการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิตด้วย โดยที่สภาวะการผลิตที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และ 8 จะเกิดรอยแตกและรอยแยกเป็นจำนวนมาก ขณะเดียวกันเมื่อมีการควบคุมสภาวะของการผลิตให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11, 10 และ 9 ปริมาณของรอยแตกบนผิวของเม็ดแป้งดัดแปรที่ผลิตได้จะลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อรอยแตกที่เกิดขึ้นพบว่า จะมีรอยแตกเกิดบนพื้นผิวเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น

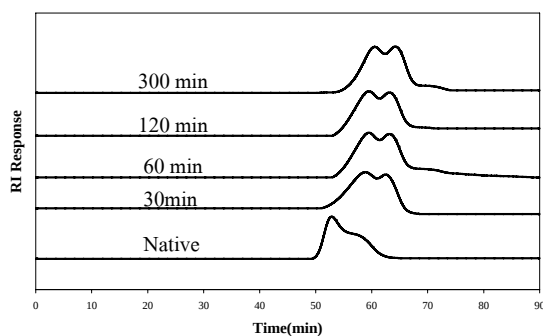


ภาพที่ 14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเป็้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ 3,000 เท่า

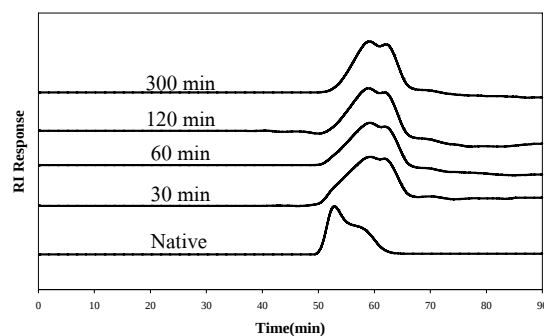


ภาพที่ 14 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเป็งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยไฮเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของแอทฟลอรินร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ 3,000 เท่า

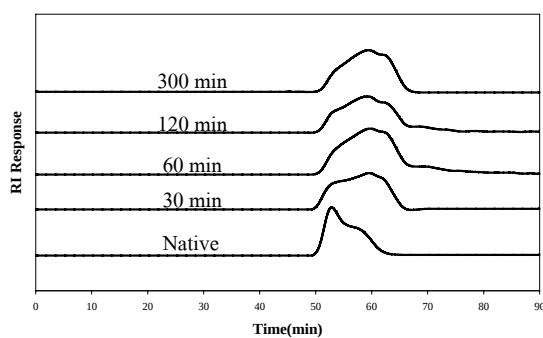
แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส และ อะมิโลเพกทิน ซึ่งเป็นโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบหลัก โดยอะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าอะมิโลเพกทินซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง ความแตกต่างของขนาดโมเลกุลสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ High Performance Size Exclusion Chromatography โดยโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะถูกชะออกมาได้ช้าจึงปรากฏพีคบนโครมาโตแกรมที่เวลามาก ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์เป็นลำดับแรกจึงปรากฏพีคบนโครมาโตแกรมที่เวลาน้อยกว่า จากโครมาโตแกรมของแป้งมันสำปะหลังดิบ จะเห็นว่าองค์ประกอบหลักของแป้งแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่ถูกชะออกมาก่อน และโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งถูกชะออกมาภายหลังและปรากฏเป็นบ่าของพีคแรก (ดังแสดงในภาพที่ 15) การดัดแปรแป้งด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลขององค์ประกอบภายในเม็ดแป้งอย่างเห็นได้ชัด โดยทุกตัวอย่างของแป้งออกซิไดซ์จะมีขนาดโมเลกุลเล็กลงเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับสมบัติด้านความหนืดของแป้ง (ตารางที่ 2) แป้งที่ผลิตในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และ 8 จะมีขนาดโมเลกุลขององค์ประกอบลดลงอย่างเด่นชัดตั้งแต่เวลา 30 นาทีแรก และเวลาการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นจนถึง 300 นาทีไม่มีผลต่อโครมาโตแกรมของแป้งดัดแปร ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 มีการลดขนาดโมเลกุลน้อยที่สุด โดยสังเกตได้ว่ามีสัดส่วนขององค์ประกอบที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มากกว่าที่สภาวะอื่น สำหรับแป้งที่ผลิตในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 แป้งที่ผลิตได้จะมีขนาดโมเลกุลลดลงตามระยะเวลาการผลิตที่นานขึ้น จนถึง 120 นาที โครมาโตแกรมจึงมีลักษณะค่อนข้างคงที่ (ภาพที่ 15)



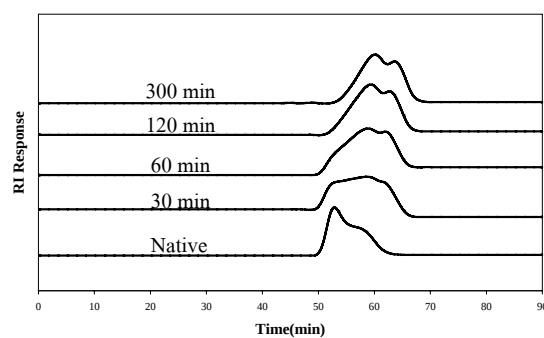
ก.



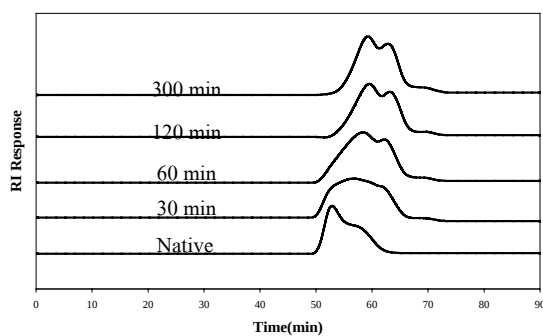
ข.



ค.



ง.



จ.

ภาพที่ 15 โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ (ความเข้มข้นของเอทิลฟลอรีน ร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

- ก. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7
- ข. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8
- ค. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9
- ง. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10
- จ. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11

2. ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ต่อการคัดแปรแป้งมันสำปะหลัง

2.1 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ต่อสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้ง

สภาวะของการผลิตแป้งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตได้ซึ่งนอกจากค่าความเป็นกรด-ด่าง และเวลาในการทำปฏิกิริยาแล้ว ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์เป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติของแป้ง ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ต่อสมบัติของแป้ง ได้ทำการผลิตแป้งออกซิไดซ์ภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 300 นาที โดยแปรความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ให้มีปริมาณแอกทิฟคลอรีนร้อยละ 1, 3 และ 5 ต่อน้ำหนักแป้ง ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งคัดแปรแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตใน
สภาวะที่มีความเข้มข้นของแอกทิฟคลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30
องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)^{1,2}

หมู่คาร์บอนิล (ร้อยละ)					
ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
1	0.168±0.04 ^{a,C}	0.110±0.00 ^{ab,C}	0.056±0.01 ^{b,C}	0.063±0.01 ^{b,B}	0.043±0.02 ^{b,B}
3	0.356±0.04 ^{a,B}	0.253±0.03 ^{ab,B}	0.176±0.02 ^{bc,B}	0.119±0.03 ^{c,AB}	0.094±0.01 ^{c,AB}
5	0.499±0.02 ^{a,A}	0.418±0.03 ^{a,A}	0.253±0.00 ^{b,A}	0.154±0.03 ^{c,A}	0.131±0.02 ^{c,A}
หมู่คาร์บอกซิล (ร้อยละ)					
ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
1	0.128±0.01 ^{c,C}	0.236±0.01 ^{a,C}	0.239±0.01 ^{a,C}	0.195±0.01 ^{b,C}	0.174±0.01 ^{b,C}
3	0.497±0.00 ^{c,B}	0.806±0.03 ^{a,B}	0.838±0.04 ^{a,B}	0.682±0.05 ^{b,B}	0.579±0.04 ^{c,B}
5	0.694±0.04 ^{d,A}	1.190±0.05 ^{b,A}	1.293±0.06 ^{a,A}	1.149±0.04 ^{b,A}	0.889±0.07 ^{cd,A}

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์
เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² n.d = not detected (ตัวอย่างเริ่มเป็นเจลอ่อน ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดจึงไม่สามารถ
ตรวจวัดค่าความหนืดได้)

³ แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

ตารางที่ 4 (ต่อ) สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะที่มีความเข้มข้นของเอทิลฟลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)^{1,2}

ความหนืด (mPa.s) ³					
ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
1	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
3	14.04±1.12 ^{bc,A}	21.41±1.07 ^{b,A}	60.63±4.24 ^{a,A}	20.35±1.18 ^{bc,A}	13.00±0.39 ^{c,A}
5	8.14±0.20 ^{c,B}	7.94±0.13 ^{c,B}	17.58±1.60 ^{a,B}	12.02±0.38 ^{b,B}	6.90±0.68 ^{c,B}
ความขาว (Kett scale)					
ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
1	95.93±2.02 ^{c,A}	96.75±0.07 ^{bc,A}	98.68±0.25 ^{ab,AB}	99.33±0.04 ^{a,NS}	99.25±0.21 ^{a,NS}
3	95.13±0.32 ^{b,A}	96.05±0.92 ^{b,A}	98.83±0.32 ^{a,A}	99.60±0.28 ^{a,NS}	99.85±0.07 ^{a,NS}
5	92.38±0.32 ^{c,B}	91.40±0.85 ^{c,B}	96.88±0.67 ^{b,B}	99.10±0.00 ^{a,NS}	99.03±0.04 ^{a,NS}

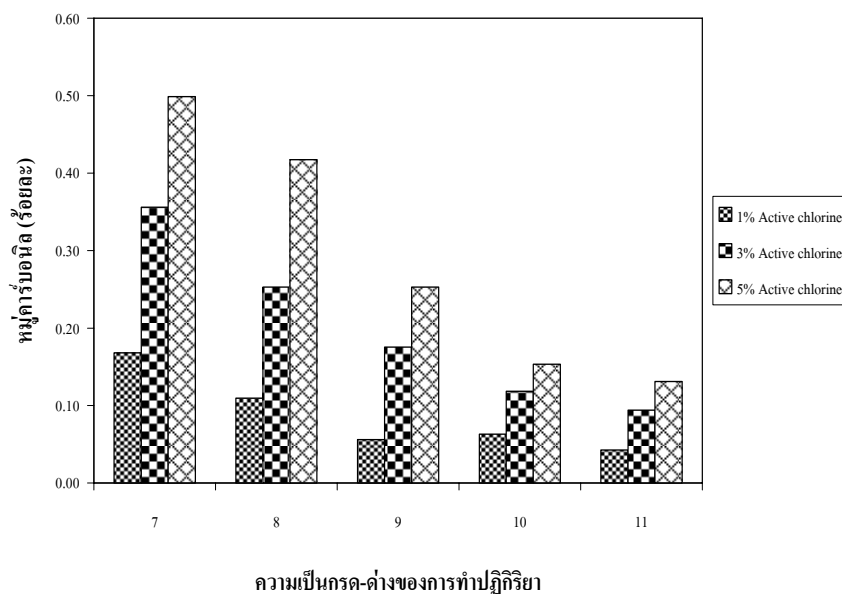
หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถว และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² n.d = not detected (ตัวอย่างเริ่มเป็นเจลอ่อน ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดจึงไม่สามารถตรวจวัดค่าความหนืดได้)

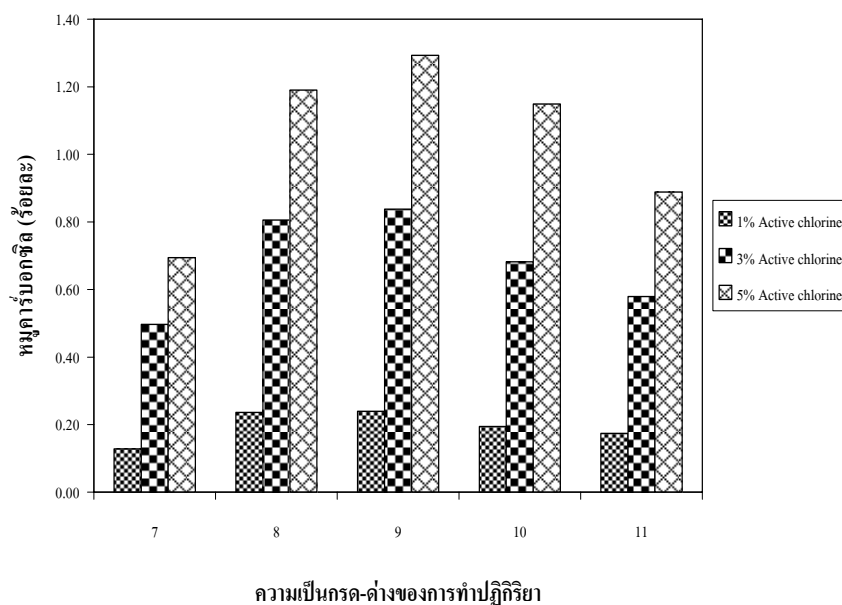
³ แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

เมื่อพิจารณาผลของสภาวะการผลิตแป้งคัดแปรต่อปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่เกิดขึ้นในโมเลกุลแป้ง พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนเพิ่มขึ้นแป้งคัดแปรจะมีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการเกิดหมู่คาร์บอนิลในแป้งคัดแปร จะเห็นว่าทุกระดับของความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนให้ผลเหมือนกัน กล่าวคือปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีค่ามากที่สุด เมื่อทำการผลิตแป้งที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 รองลงมาคือที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ตามลำดับ (ภาพที่ 16)

ภาพที่ 17 แสดงปริมาณหมู่คาร์บอกซิลของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการคัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ซึ่งพบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล มีปริมาณสูงขึ้นตามความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่ใช้ในการคัดแปร และเมื่อพิจารณาผลของความเป็นกรด-ด่าง ต่อการเกิดหมู่คาร์บอกซิลที่ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนต่างๆ จะเห็นว่าให้ผลที่คล้ายคลึงกันกล่าวคือ ที่ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 1 และ 3 แป้งคัดแปรจะมีหมู่คาร์บอกซิลเกิดมากที่สุดเมื่อสภาวะการผลิตมีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 และ 9 รองลงมาคือที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10, 11 และ 7 ตามลำดับ ขณะที่เมื่อความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 5 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลจะผลิตได้ดีที่สุดที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 (ตารางที่ 4 และภาพที่ 17)

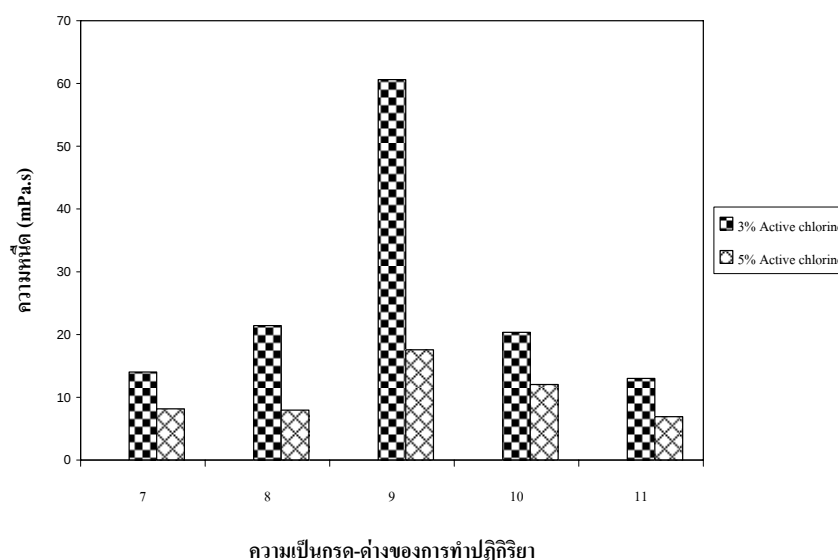


ภาพที่ 16 ปริมาณหมู่คาร์บอนิลของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะที่มีความเข้มข้นของแอกทิฟคลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)



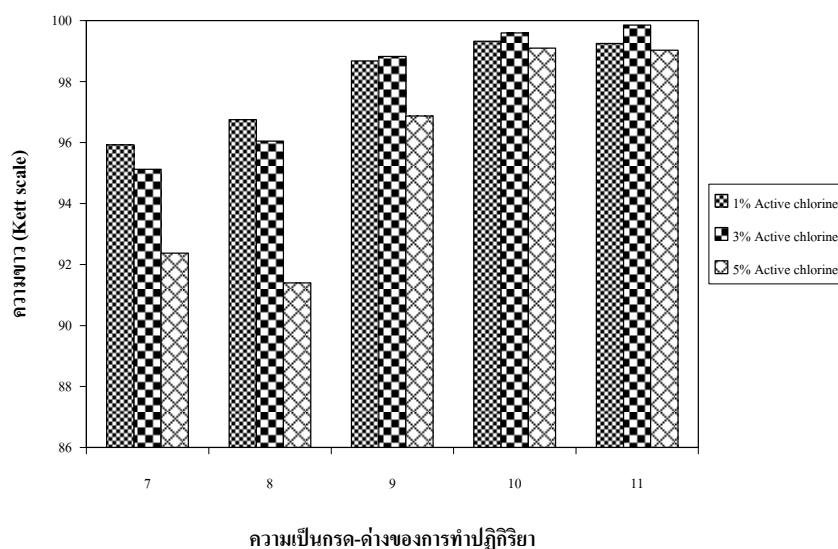
ภาพที่ 17 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะที่มีความเข้มข้นของแอกทิฟคลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 1 พบว่าแป้งเปียกเริ่มเกาะตัวเป็นเจลอ่อน (weak gel) ณ อุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดค่าความหนืด (ที่ 50 องศาเซลเซียส) จึงไม่สามารถทำการตรวจวัดค่าความหนืดได้ ซึ่งพบแบบเดียวกันที่สภาวะการผลิตทุกความเป็นกรด-ด่าง แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนน้อยแต่ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังคงที่ทำให้อัตราส่วนการเข้าทำปฏิกิริยากันของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ต่อแป้งทั้งหมดลดลงทำให้การตัดพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลแป้งเกิดได้ค่อนข้างน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนืดของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะที่มีแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 และ 5 พบว่าแป้งตัดแปรมีความหนืดลดลงตามความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ที่สูงขึ้น และจากภาพที่ 18 จะเห็นว่าผลของความเป็นกรด-ด่างที่ระดับความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนทั้งสองระดับมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ แป้งตัดแปรที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 จะมีความหนืดสูงสุด และเมื่อสภาวะความเป็นกรด-ด่างของการผลิตแป้งมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ความหนืดของแป้งตัดแปรมีค่าต่ำลงตามลำดับ



ภาพที่ 18 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสภาวะที่มีความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

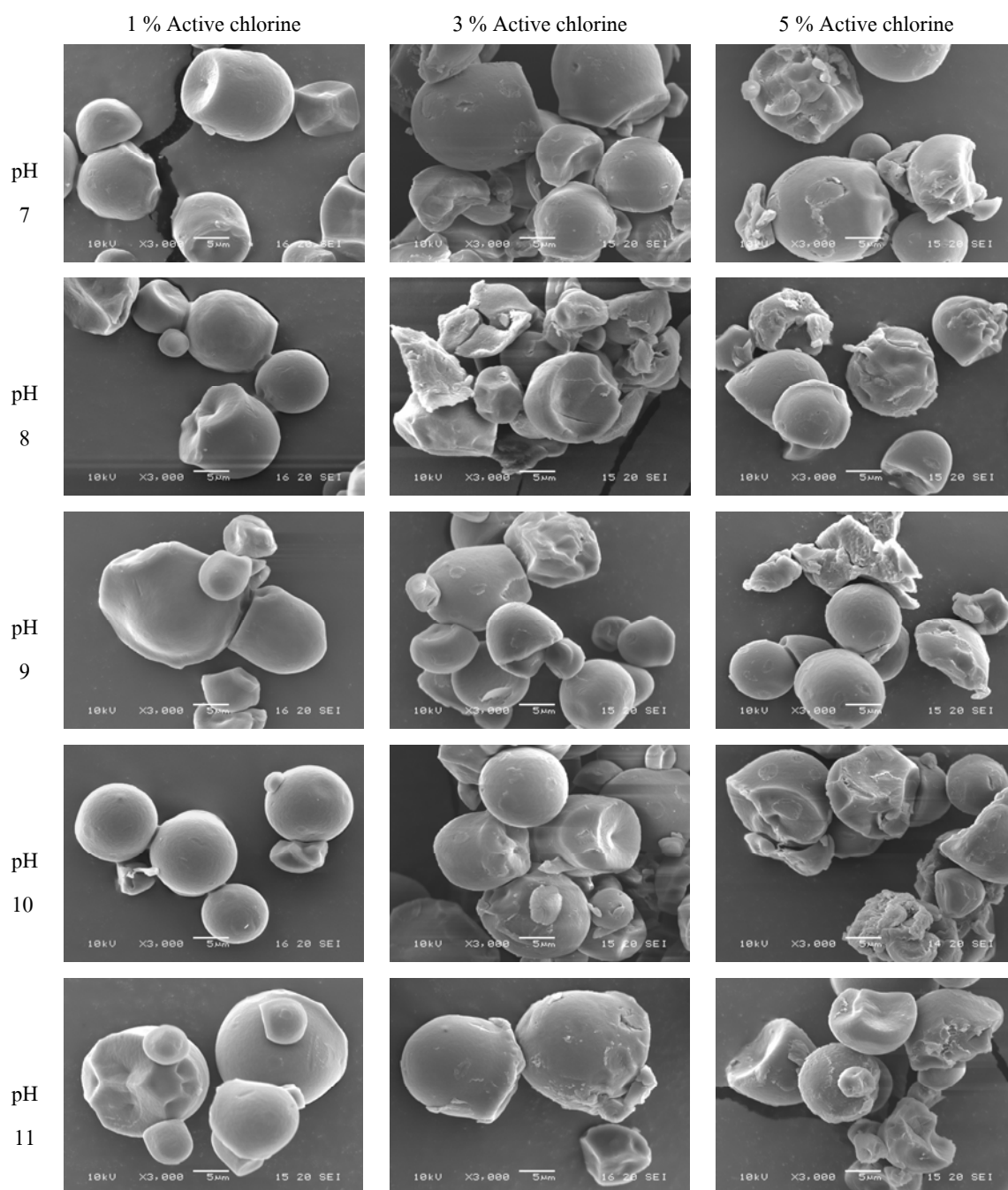
สำหรับการตรวจวิเคราะห์สมบัติด้านความขาวของแป้ง พบว่าผลของความเข้มข้นของความเป็นกรด-ด่างใน ทุกความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือแป้งที่ผลิตในสถานะที่มีความ เป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9, 10 และ 11 จะให้แป้งที่มีความขาวสูงกว่าแป้งที่ผลิตในสถานะที่มีความเป็น กรด-ด่างเท่ากับ 7 และ 8 และเมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนต่อความขาวของ แป้งดัดแปร พบว่าผลดังกล่าวขึ้นกับสถานะความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการผลิตโดยที่ความ เข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนในช่วงร้อยละ 1-5 ไม่มีผลต่อความขาวของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตใน สถานะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 อย่างไรก็ตามก็ดีกว่าสถานะที่มีความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7- 9 แป้งดัดแปรที่มีแนวโน้มที่จะมีความขาวลดลงตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของแอกทีฟคลอรีนที่ใช้ใน การทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 (ตารางที่ 4 และภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 ความขาวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะที่มี ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศา เซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

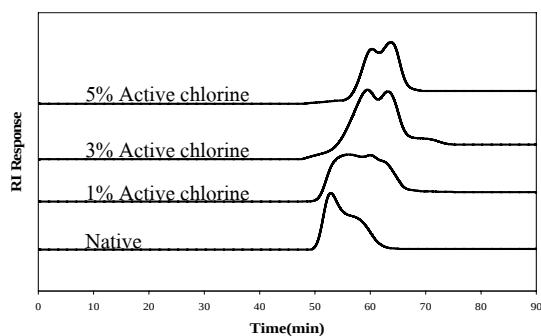
2.2 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ต่อสมบัติทางโครงสร้างของแป้ง

เมื่อส่องดูเม็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ที่ระดับความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 1, 3 และ 5 ที่ความเป็นกรด-ด่างต่างๆ พบว่า เม็ดแป้งดัดแปรที่ผลิตในทุกสภาวะยังคงสภาพและรูปร่างเดิมของเม็ดแป้งแต่พื้นผิวมีรอยแตก รอยแยก และมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งรอยแตกจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ กล่าวคือ ที่ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 1 มีรอยแตกเพียงบางจุดบนพื้นผิวของเม็ดแป้ง เมื่อความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 จะพบรอยแตกและรอยแยก พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบเป็นจำนวนมากสอดคล้องกับ Rutenberg and Solarek (1984) ซึ่งรายงานว่าการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งสาธิตออกซิไดซ์จะเริ่มสังเกตเห็นได้ที่ระดับความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของความเป็นกรด-ด่างในทุกระดับความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่ใช้ในการทดลอง จะเห็นว่าให้ผลไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ การเกิดรอยแตกบนผิวเม็ดแป้งจะมีมากที่สุดที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และ 8 (ภาพที่ 20)

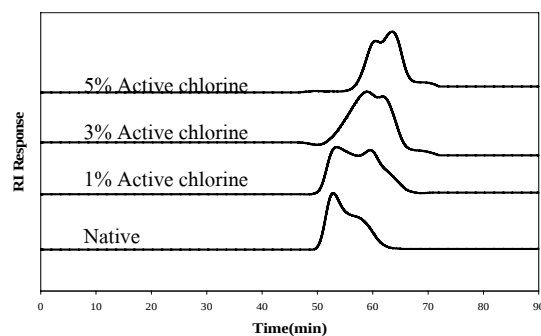


ภาพที่ 20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ผลิตในสถานะที่มีความเข้มข้นของเอทิลฟลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที) เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

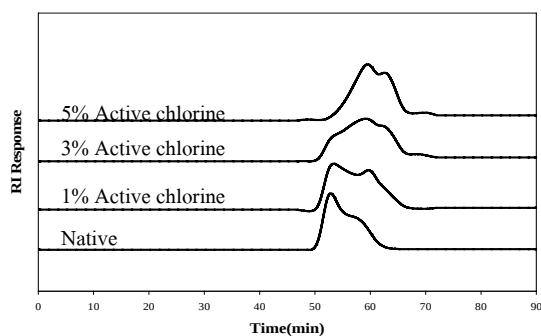
ภาพที่ 21 แสดงโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่ผลิตในสถานะที่มีความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 1, 3 และ 5 และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนจะเห็นว่าแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่ใช้ในการผลิตมีค่าเพิ่มขึ้น โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในเม็ดแป้งจะถูกย่อยให้มีขนาดสั้นลง ระยะเวลาที่องค์ประกอบต่างๆ ถูกชะออกจากคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นตามลำดับความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนที่มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแป้งดังกล่าวมีผลต่อสมบัติความหนืด ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 4 จะเห็นว่า ค่าความหนืดจะลดต่ำลงเมื่อสถานะการผลิตมีการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Wang and Wang (2003)



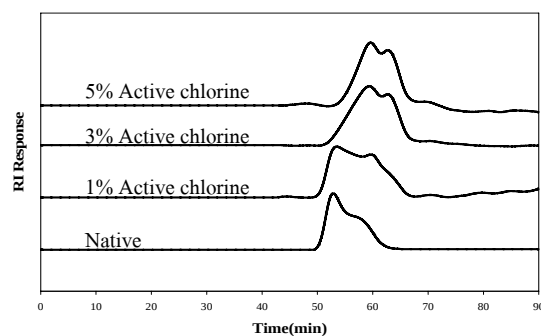
ก.



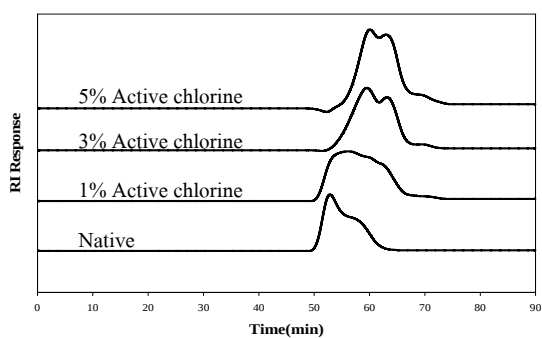
ข.



ค.



ง.



จ.

- ภาพที่ 21 โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ผลิตในสถานะที่มีความเข้มข้นของเอทิลฟลอรีน และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)
- ก. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7
 - ข. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8
 - ค. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9
 - ง. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10
 - จ. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11

3. ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์

3.1 ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้ง

สภาวะของการผลิตแป้งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตได้ นอกจากค่าความเป็นกรด-ด่าง เวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์แล้ว อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติของแป้ง ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของแป้งที่ดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ โดยการผลิตแป้งออกซิไดซ์ภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 เวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 300 นาที ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ให้มีปริมาณแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 ต่อน้ำหนักแป้ง โดยแปรอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาที่ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งดัดแปรแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอททิฟคลอรีนร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)¹

หมู่คาร์บอนิล (ร้อยละ)						
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา					ค่าเฉลี่ย
	7	8	9	10	11	
30	0.356±0.04	0.253±0.03	0.176±0.02	0.119±0.03	0.094±0.01	0.199 ^{NS}
40	0.317±0.02	0.197±0.03	0.118±0.01	0.103±0.00	0.096±0.03	0.166 ^{NS}
50	0.249±0.02	0.197±0.02	0.152±0.03	0.092±0.01	0.063±0.00	0.150 ^{NS}
ค่าเฉลี่ย	0.307 ^a	0.216 ^b	0.148 ^c	0.104 ^d	0.084 ^d	
หมู่คาร์บอกซิล (ร้อยละ)						
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา					ค่าเฉลี่ย
	7	8	9	10	11	
30	0.497±0.00	0.806±0.03	0.838±0.04	0.682±0.05	0.579±0.04	0.675 ^{NS}
40	0.447±0.02	0.741±0.05	0.761±0.02	0.618±0.02	0.529±0.02	0.643 ^{NS}
50	0.587±0.00	0.739±0.02	0.806±0.03	0.623±0.02	0.458±0.04	0.619 ^{NS}
ค่าเฉลี่ย	0.510 ^c	0.762 ^a	0.801 ^a	0.641 ^b	0.514 ^c	

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

² แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

ตารางที่ 5 (ต่อ) สมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอคติฟคลอรีนร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)¹

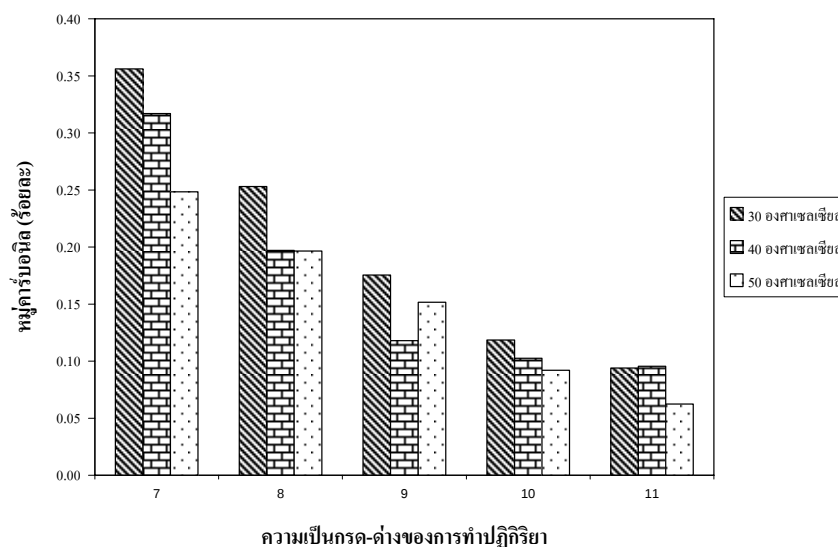
อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความหนืด (mPa.s) ²				
	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
30	14.04±1.12 ^{bc,A}	21.41 ±1.07 ^{b,A}	60.63 ±4.24 ^{a,A}	20.35±1.18 ^{bc,NS}	13.00 ±0.39 ^{c,NS}
40	11.71±0.83 ^{c,AB}	17.19±0.42 ^{b,AB}	25.49 ±1.73 ^{a,B}	16.79 ±0.42 ^{b,NS}	12.49 ±0.29 ^{c,NS}
50	9.36 ±0.20 ^{b,B}	12.94 ±1.84 ^{b,B}	18.89 ±0.65 ^{a,B}	18.08 ±1.03 ^{a,NS}	13.24±1.04 ^{b,NS}
อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความขาว (Kett scale)				
	ความเป็นกรด-ด่างของการทำปฏิกิริยา				
	7	8	9	10	11
30	95.13±0.32 ^{b,NS}	96.05±0.92 ^{b,NS}	98.83±0.32 ^{a,A}	99.60±0.28 ^{a,A}	99.85±0.07 ^{a,NS}
40	95.40±0.00 ^{d,NS}	94.70±0.00 ^{c,NS}	97.95±0.07 ^{c,B}	98.75±0.00 ^{b,AB}	99.60±0.00 ^{a,NS}
50	95.00±0.00 ^{d,NS}	94.55±0.07 ^{cd,NS}	95.30±0.14 ^{c,C}	98.05±0.21 ^{b,B}	99.45±0.21 ^{a,NS}

หมายเหตุ ¹ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

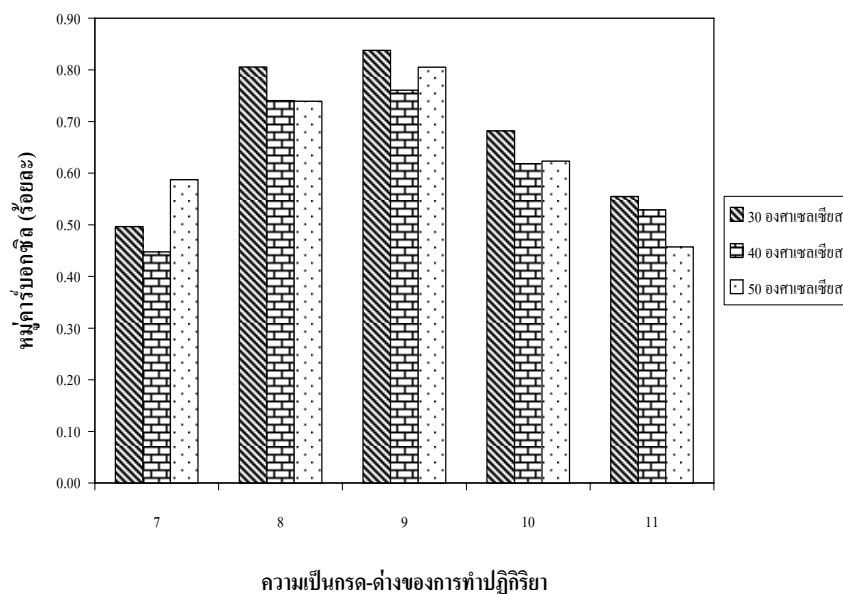
² แสดงการตรวจวัดความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราแรงเฉือน 40 s⁻¹

จากการวิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดขึ้นในโมเลกุลแป้งพบว่า อุณหภูมิของกระบวนการดัดแปรไม่มีผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นใน โมเลกุลแป้ง แต่ปริมาณ หมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากสถานะความเป็นกรด-ด่างซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับ การศึกษาใน 2 หัวข้อแรกคือหมู่คาร์บอนิลเกิดได้ดีที่สถานะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และจะเกิด ได้น้อยลงในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 5 และภาพที่ 22) ส่วนหมู่คาร์บอกซิล จะเกิดได้มากที่สุดที่สถานะความเป็นกรด-ด่างในช่วง 8-9 และจะเกิดได้น้อยลงเมื่อความเป็นกรด- ด่างมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ (ตารางที่ 5 และภาพที่ 23)

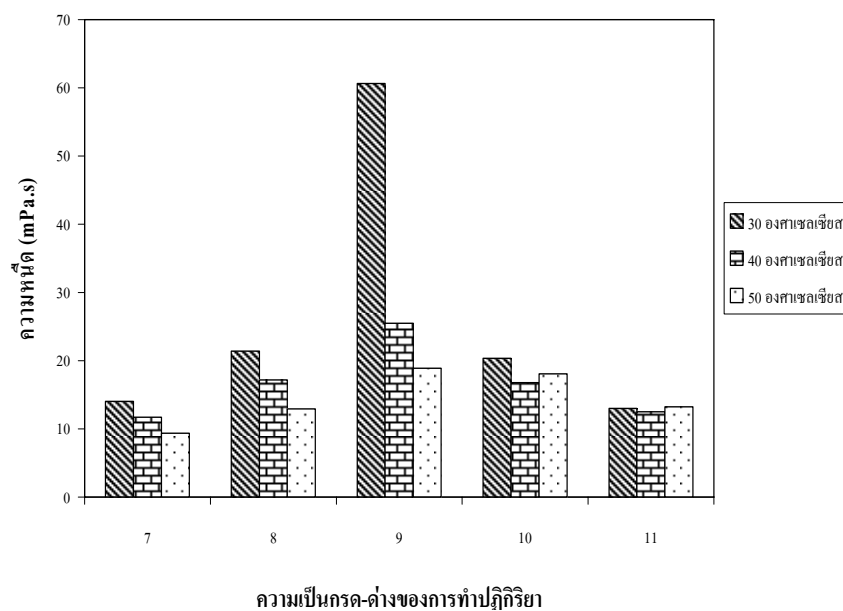
สำหรับความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ จะมีค่าความ หนืดลดลงตามระดับอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 24) และเมื่อพิจารณาถึงผลของความ เป็นกรด-ด่างต่อค่าความหนืดในแป้งดัดแปร พบว่า ทุกระดับของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ใช้ใน การทดลองให้ผลเหมือนกัน กล่าวคือ ความหนืดของแป้งมีค่าสูงสุดเมื่อสถานะความเป็นกรด-ด่าง ของการดัดแปรมีค่าเท่ากับ 9 และความหนืดของแป้งดัดแปรจะมีค่าลดลงเมื่อสถานะความเป็นกรด- ด่างของกระบวนการผลิตมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้



ภาพที่ 22 ปริมาณหมู่คาร์บอนิลของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิ การทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของเอทิลฟลอรินร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

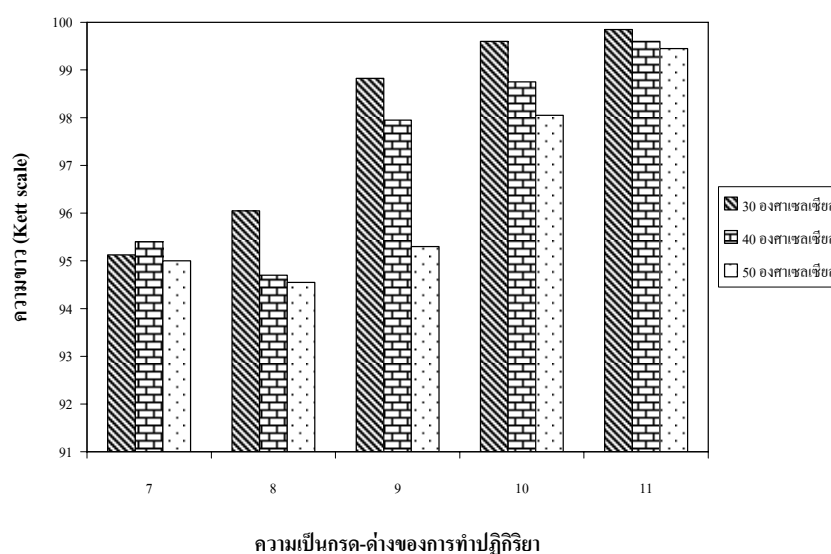


ภาพที่ 23 ปริมาณหมู่คาร์บอนไดออกไซด์ของน้ำมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)



ภาพที่ 24 ความหนืดของน้ำมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

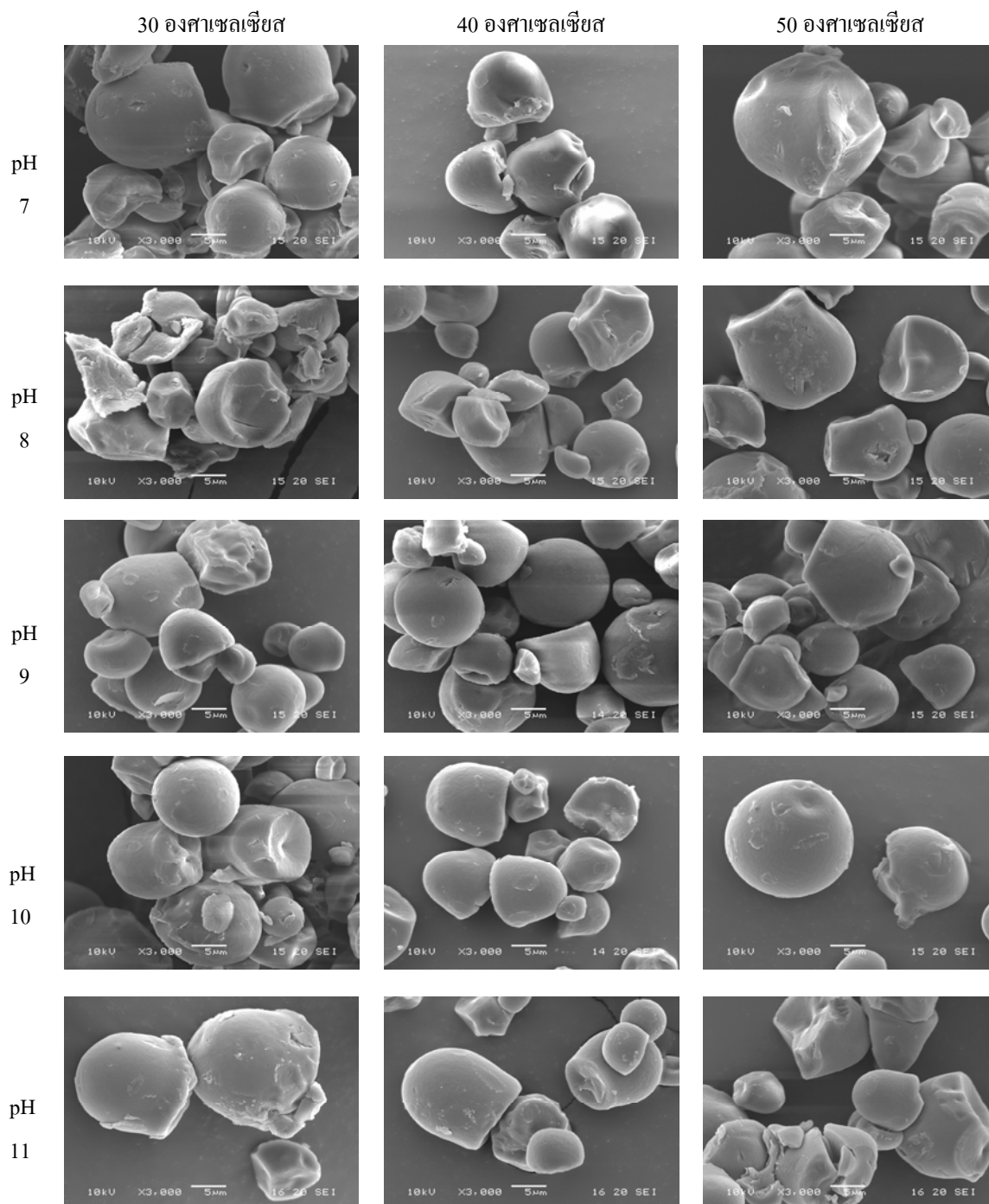
สำหรับการตรวจวิเคราะห์สมบัติด้านความขาวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ พบว่า ความขาวของแป้งดัดแปรที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีค่าความขาวเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสถานะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 มีความขาวสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อความขาวของแป้งดัดแปร พบว่าผลดังกล่าวขึ้นกับสถานะความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการผลิต โดยที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาในช่วง 30-50 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อความขาวของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสถานะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7, 8 และ 11 อย่างไรก็ตามที่สถานะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 และ 10 แป้งดัดแปรที่หมักในน้ำจะมีความขาวลดลงตามอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rutenberg and Solarek (1984) ที่ว่าแป้งออกซิไดซ์เมื่ออยู่ในภาวะที่อุณหภูมิสูง จะเกิดสีเหลืองหรือน้ำตาล ซึ่งมีผลให้ค่าความขาวของแป้งลดลง (ภาพที่ 25)



ภาพที่ 25 ความขาวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอคติฟคลอรีนร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

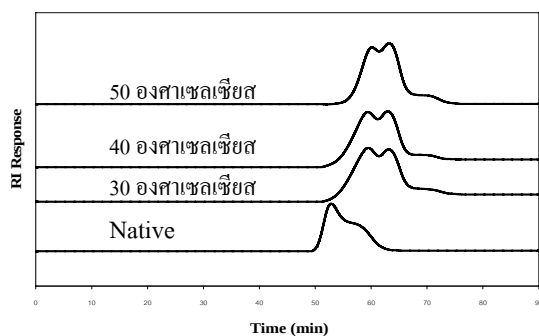
3.2 ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อสมบัติทางโครงสร้างของแป้ง

ผลการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า ลักษณะภายนอกของแป้งมันสำปะหลังดิบที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ เมื่อถูกทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์จะมีพื้นผิวเป็นรอยแตกและรอยแยก ผิวมีลักษณะไม่เรียบ โดยผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ทุกอุณหภูมิจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และ 8 จะเกิดรอยเป็นจำนวนมาก ขณะเดียวกันเมื่อมีการควบคุมสภาวะของการผลิตให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 11, 10 และ 9 ปริมาณของรอยแตกบนผิวของเม็ดแป้งตัดแปรที่ผลิตได้จะลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อรอยแตกที่เกิดขึ้น ในสภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเดียวกัน พบว่า อุณหภูมิการผลิตในช่วง 30-50 องศาเซลเซียสไม่มีผลต่อลักษณะของเม็ดแป้งมากนัก แป้งตัดแปรที่ผลิตในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีลักษณะเม็ดแป้งและพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 26)

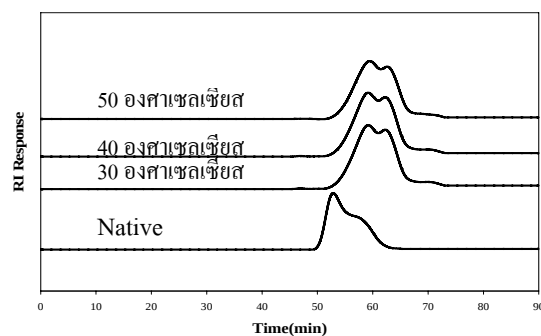


ภาพที่ 26 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอทฟลอริน ร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที) เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ กำลังขยาย 3,000 เท่า

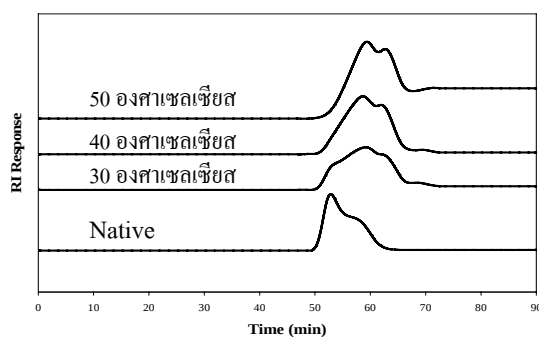
ภาพที่ 27 แสดงโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยไฮโดรเจนไฮโปคลอไรท์ ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยแปรค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 7-11 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที พบว่า แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยไฮโดรเจนไฮโปคลอไรท์ในทุกสภาวะความเป็นกรด-ด่างมีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยสังเกตได้ว่าองค์ประกอบโมเลกุลของแป้งดัดแปรใช้ระยะเวลาในการถูกระงับออกจากคอลัมน์นานกว่าองค์ประกอบโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังดิบ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการผลิตต่อขนาดโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดแป้ง พบว่าอุณหภูมิการผลิตในช่วงที่ทำการศึกษานี้ไม่มีผลต่อขนาดโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ที่ 7, 8, 10 และ 11 ผลของอุณหภูมิการผลิตต่อขนาดโมเลกุลของแป้งสังเกตได้เฉพาะในกรณีของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 โดยพบว่าองค์ประกอบโมเลกุลของแป้งดัดแปรมีขนาดเล็กลง เมื่ออุณหภูมิการผลิตมีค่าสูงขึ้น



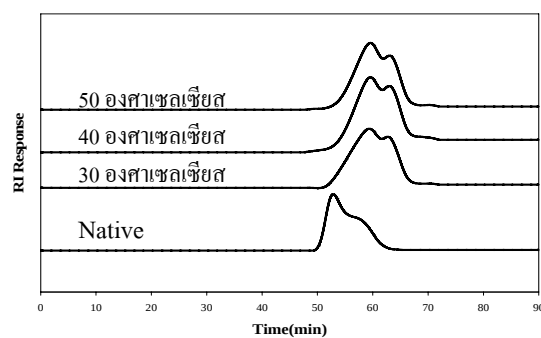
ก.



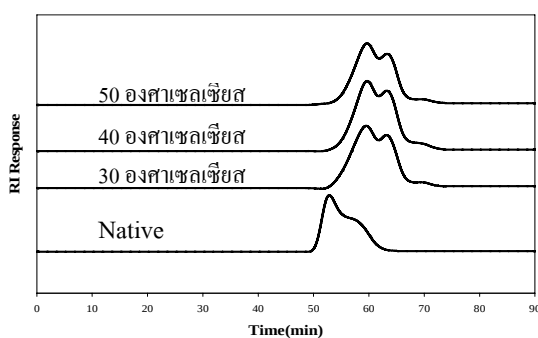
ข.



ค.



ง.



จ.

ภาพที่ 27 โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และความเป็นกรด-ด่างต่างๆ (ความเข้มข้นของแอกทิฟคลอรีนร้อยละ 3 เวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที)

- ก. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7
- ข. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8
- ค. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9
- ง. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10
- จ. ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11

สรุป

1. ในการศึกษาผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 ต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ที่ความเข้มข้นของแอกทีฟคลอรีนร้อยละ 3 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยา 30-300 นาที พบว่า แป้งดัดแปรที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล ความขาวและรอยแตกบนพื้นผิวเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น แต่มีความหนืดและขนาดโมเลกุลของแป้งลดลง เมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ ทั้งนี้ระดับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการดัดแปรแป้ง ดังนี้

- หมู่คาร์บอนิลจะเกิดได้ดีที่สุด ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และจะมีค่าลดลงตามสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่สูงขึ้น ปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีค่าคงที่ตลอดเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30-300 นาที

- หมู่คาร์บอกซิลจะเกิดได้ดีที่สุดที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ 8 และ 9 และจะเกิดได้น้อยลงเมื่อสภาวะความเป็นกรด-ด่าง สูงหรือต่ำกว่านี้ โดยที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ 7, 8 และ 9 เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่าง 30-300 นาที ไม่มีผลต่อปริมาณหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดขึ้น แต่ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ 10 และ 11 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลจะมีค่าสูงขึ้นตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น

- สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7 จะให้แป้งดัดแปรที่มีความหนืดต่ำสุด ในขณะที่สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 จะให้แป้งที่มีความหนืดสูงสุด โดยแป้งที่ผลิตในทุกสภาวะความเป็นกรด-ด่าง จะมีความหนืดลดลงตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดโมเลกุลของแป้ง ซึ่งพบว่าแป้งที่ดัดแปรในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 จะมีองค์ประกอบของโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าแป้งที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างอื่นๆ

- สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่าง ในช่วง 9-11 จะให้แป้งดัดแปรที่มีความขาวอยู่ในช่วง 98.00 และ 99.88 ซึ่งสูงกว่าแป้งที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ 7 และ 8 ซึ่งมีความขาวอยู่ในช่วง 95.12-97.30

- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งเมื่อสภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และ 8 จะเกิดรอยแตกและรอยแยกบนพื้นผิวเม็ดแป้งมากที่สุด และจะเกิดได้น้อยลงเมื่อสภาวะความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดยแป้งที่ผลิตในทุกสภาวะความเป็นกรด-ด่างจะมีรอยเกิดบนพื้นผิวเม็ดแป้งเพิ่มขึ้นตามเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น

2. ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่มีปริมาณแอกทิฟคลอรีนร้อยละ 1-5 ต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที พบว่า แป้งดัดแปรที่มีปริมาณหมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล รอยแตกบนผิวเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น แต่มีค่าความหนืด ขนาดโมเลกุลของแป้ง และความขาวลดลง

3. ในการศึกษาผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ 30-50 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่ความเข้มข้นของแอกทิฟคลอรีนร้อยละ 3 ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-11 และเวลาการทำปฏิกิริยา 300 นาที พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณหมู่คาร์บอนิล หมู่คาร์บอกซิล และลักษณะของเม็ดแป้ง แต่มีผลต่อความหนืด ขนาดโมเลกุลของแป้ง และความขาว ซึ่งจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการดัดแปรแป้ง สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7, 8 และ 9 แป้งดัดแปรจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อความหนืดเมื่อสภาวะการผลิตมีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 และ 11 สภาวะการผลิตที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 ขนาดโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของเม็ดแป้งดัดแปรมีขนาดเล็กลงเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อขนาดโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของแป้งออกซิไดซ์ที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่สูงหรือต่ำกว่านี้ สภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 และ 10 ความขาวของแป้งดัดแปรมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อความขาวที่ผลิตในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7, 8 และ 11

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546ก. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2546ข. บทที่ 9 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง, น. 1-14. ใน เอกสารประกอบการฝึกอบรมโครงการพัฒนาศักยภาพการผลิตและการตลาดมันสำปะหลัง 4-8 ส.ค. 2546. มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร, กรุงเทพฯ.

เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์. 2546. บทที่ 1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมันสำปะหลัง, น. 1-33. ใน เอกสารประกอบการฝึกอบรมโครงการพัฒนาศักยภาพการผลิตและการตลาดมันสำปะหลัง 4-8 ส.ค. 2546. มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร, กรุงเทพฯ.

สมจิตต์ บวรวัฒนาโสภณ และ วรณภา ตันยีนยงค์. 2544. สารฟอกขาว.วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 49 (157): 32-35.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2521. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง. มอก. 274-2521.

_____. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. มอก. 1073-2535.

อรพิน ภูมิภมร. 2533. เทคโนโลยีของแป้ง: เคมีของแป้งและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์จากแป้งบางชนิดที่ผลิตในประเทศไทย. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ .

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

- BeMiller, J. N. 1997. Starch modification: challenges and prospects. **Starch/Starke**. 49: 127-131.
- Boruch, M. 1985. Transformations of potato starch during oxidation with hypochlorite. **Starch/starke**. 37: 91-98.
- Chattopadhyay, S., R. S. Singhal and P. R. Kulkarni. 1997. Optimization of conditions of synthesis of oxidised starch from corn and amaranth for use in film-forming applications. **Carbo. Polym.** 34: 203-212.
- Chung, M. G., Y. S. Jeon, S. K. Lee, J. M. Park and B. S. Lim. 1998. Physicochemical properties of oxidized waxy maize starches with sodium hypochlorite. **Kor. J. Food. Sci. Tech.** 30(1): 42-48. FSTA Database. Accession no. 1999-08-Le0322.
- Collison, R. 1968. Starch retrogradation, pp. 194-202. In J. A. Radley, ed. **Starch and Its Derivatives**. 4th ed. Chapman and Hall, London.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2001. **FAO Food and Nutrition**. Paper 52 Addendum 9. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Forssell, P., A. Hamunen, K. Autio, T. Suortti and K. Poutanen. 1995. Hypochlorite oxidation of barley and potato starch. **Starch/starke**. 47: 371-377.
- Gallant, D. J., B. Bouchet, A. Buleon and S. Perez. 1992. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzymatic degradation. **Eur. J. Clin. Nutri.** 46: S3-S16.
- Govindasamy, S., C. G. Oates and H. A. Wong. 1992. Characterization of changes of sago starch components during hydrolysis by a thermostable alpha-amylase. **Carbo. Polym.** 18: 89-100.

- Han, J. S. and S. Y. Ahn. 1997. Characteristics in oxidation of Korean corn starch with sodium hypochlorite. **Kor. J. Food. Sci. Tech.** 29(6): 1094-1100. FSTA Database. Accession no. 1999-05-Le0191.
- Hebeish, A., I. Abd El-Thalouth, R. Refai and A. Ragheb. 1989. Synthesis and characterization of hypochlorite oxidized starches. **Starch/starke**. 41: 293-298.
- Hullinger, C. H. 1964. Hypochlorite-oxidized starch, pp 313-315. In R.L. Whistler, ed. **Methods in Carbohydrate Chemistry Vol IV**. Academic Press, New York.
- _____ and R. L. Whistler. 1951. Oxidation of amylose with hypochlorite and hypochlorous acid. **Cereal Chem.** 28: 153-157.
- Kuakpetoon, D. and Y. J. Wang. 2001. Characterization of different starches oxidized by hypochlorite. **Starch/starke**. 53: 211-218.
- Leach, H. W. 1965. Gelatinization of starch, pp. 289-307. In R.L. Whistler, E. F. Paschall, J.N. BeMiller and H.J. Roberts, eds. **Starch: Chemistry and Technology Vol I**. Academic Press, New York.
- _____, L. D. McCowen and T.J. Schoch. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. **Cereal Chem.** 36:534-544.
- Li, J. H. and T. Vasanthan. 2003. Hypochlorite oxidation of field pea starch and its suitability for noodle making using an extrusion cooker. **Food Res. Int.** 36 : 381-386.
- Light, J. M. 1990. Modified food starches: why, what, where, and how. **Cereal Foods World**. 35(11): 1081-1092.

- Mukprasirt, A. 2000. **Rice flour based batter: rheological, textural, microstructural, and storage properties.** Dissertation. Kansas state university.
- Oates, C. G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends Food Sci. Tech.** 8: 375-382.
- Patel, K. F., H. U. Mehta and H. C. Srivastava. 1974. Kinetic and mechanism of oxidation of starch with sodium hypochlorite. **J. App. Polym. Sci.** 18 : 389-399.
- Radley, J. A. 1968. **Starch and Its Derivatives.** 4th ed. Chapman and Hall, London.
- _____. 1976. **Starch Production Technology.** Applied Science Publishers Ltd., London.
- Rivera, S. M. M., F. J. L. G. Suarez and M. V. del Valle. 2005. Partial characterization of banana starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. **Carbo. Polym.** 62: 50-56.
- Rutenberg, M. W. 1980. Starch and its modification, pp. 22 (1-83). In R. L. Davison, ed. **Handbook of water-soluble Gums and Resins.** McGrew-Hill book Company, New York.
- _____ and D. Solarek. 1984. Starch derivative: production and uses, pp. 311-389. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller and E. F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology,** 2nd ed. Academic Press, New York.
- Sanders, 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.

- Scallet, B. L. and E. A. Sowell. 1967. Production and use of hypochlorite oxidized starches, pp. 237-251. In R. L. Whisler and E. F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology Vol II**. Academic Press, New York.
- Schmorak, J., D. Meizler and M. Lewin. 1961. A kinetic study of the mild oxidation of wheat starch by sodium hypochlorite in the alkaline pH range. **J. Polym. Sci.** 49(152): 203-216.
- _____ and M. Lewin. 1963. The chemical and physicochemical properties of wheat starch mildly oxidized with alkaline sodium hypochlorite. **J. Polym. Sci. Part A.** 1(8): 2601-2620.
- 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.
- 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. **Carbo. Polym.** 38(2): 161-170.
- Veelaert, S., D De Wit, K. F. Gotlieb and R. Verhe. 1997. Chemical and physical transitions of periodate oxidized potato starch in water. **Carbo. Polym.** 33 : 153-162.
- 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, Y. J. and L. Wang. 2003. Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. **Carbo. Polym.** 52: 207-217.

Whistler, R. L., E. G. Linke and S. Kazeniac. 1956. Action of alkaline hypochlorite on corn starch amylose and methyl 4-O-methyl-D-glucopyranosides. **J. Am. Chem. Soc.** 78 : 4704-4709.

_____ and R. Schweiger. 1957. Oxidation of amylopectin with hypochlorite at different hydrogen ion concentrations. **J. Am. Chem. Soc.** 79: 6460-6464.

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

ภาคผนวก

วิธีการวิเคราะห์สมบัติของแป้ง

1. ปริมาณหมู่คาร์บอนิล ดัดแปลงจากวิธีของ Wang and Wang (2003)

เครื่องมือ

1. อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิพร้อมเครื่องเขย่า (Shaker waterbath, Polyscience, USA)
2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, Horiba F-23, Japan)

สารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M
2. ไฮดรอกซีลามีन ไฮโดรคลอไรด์
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 M

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งแป้งตัวอย่าง 4 กรัม ละลายน้ำ 100 มิลลิลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปเขย่าในน้ำเดือดเป็นเวลา 20 นาที
2. นำมาตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปรับความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 3.2 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M
3. เติมไฮดรอกซีลามีนรีเอเจนท์ 15 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (สารละลายไฮดรอกซีลามีนรีเอเจนท์ เตรียมโดยชั่ง ไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ 25 กรัม ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 M 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเท่ากับ 500 มิลลิลิตร)
4. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M จนกระทั่งความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3.2 บันทึกปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

5. การเตรียมแบบลงค่าจะใช้วิธีวิเคราะห์เหมือนกับตัวอย่างแต่ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวอย่าง

6. คำนวณหาค่าร้อยละหมู่คาร์บอนิลดังสูตร

$$\text{ร้อยละหมู่คาร์บอนิล} = \frac{(B-S) \times (N_{\text{HCl}}) \times 0.028 \times 100}{W}$$

เมื่อ B คือ ปริมาตร(มิลลิลิตร)สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1M ที่ใช้ไตเตรทกับน้ำกลั่น

S คือ ปริมาตร(มิลลิลิตร)สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1M ที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่าง

N คือ นอร์มอลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

W คือ น้ำหนัก(กรัม)ตัวอย่างเป้งแห้ง

2. ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล ตามวิธีของ FAO (2001)

เครื่องมือ

1. ปั๊ม (pump, Heto mate jet SUE 300E, Denmark)
2. ชุดกรอง
3. กระดาษกรอง

สารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 M
3. ฟีนอล์ฟทาลีน
4. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรทเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งแป้งตัวอย่าง 5 กรัม ผสมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 25 มิลลิลิตร กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 30 นาที
2. กรองและล้างแป้ง จนกระทั่งเกล็ดหมดซึ่งทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท หลังจากนั้นนำแป้งมาละลายน้ำ 300 มิลลิลิตรแล้วนำไปเขย่าในน้ำเดือด 15 นาที
3. ไตเตรทขณะร้อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 M โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
4. ทำการวิเคราะห์แบลงค์โดยดำเนินการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง แต่ในขั้นตอนข้อ 1 ให้ใช้น้ำกลั่นผสมกับตัวอย่างแป้งแทนการใช้กรดไฮโดรคลอริก
5. คำนวณหาค่าร้อยละหมู่คาร์บอกซิลดังสูตร

$$\text{ร้อยละหมู่คาร์บอกซิล} = \frac{(S - B) \times N_{\text{NaOH}} \times 0.045 \times 100}{W}$$

เมื่อ S คือปริมาตร(มิลลิลิตร)สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1M ที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่าง
 B คือปริมาตร(มิลลิลิตร)สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1M ที่ใช้ไตเตรทกับแบลงค์
 N คือ นอร์มอลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 W คือ น้ำหนัก(กรัม)ตัวอย่างแป้งแห้ง

3. ความหนืด

เครื่องมือ

1. เครื่อง Rheometer (rotational rheometer, Physica MCR 300, Germany)
2. อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (waterbath, WB 14, Germany)

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายน้ำแป้งเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. ให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดยกวนเขย่า fask อย่างสม่ำเสมอในช่วง 5 นาทีแรก
3. ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวัดความหนืดของแป้ง ที่อัตราแรงเฉือน (shear rate) ระหว่าง $0.1-500 \text{ s}^{-1}$
4. อ่านค่าความหนืดที่เวลา 0 และเก็บตัวอย่างไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วนำมาวัดค่าความหนืดที่เวลา 2, 4 และ 8 ชั่วโมง

4. ความขาว

เครื่องมือ

1. เครื่อง KETT Digital Whiteness Meter; Model C-100
2. ตลับใส่ตัวอย่างแป้ง
3. ถ้วยใส่ตัวอย่าง
4. แผ่นกรองแสง
5. แผ่นเทียบมาตรฐานความขาว

วิธีวิเคราะห์

1. ใส่ตัวอย่างให้สูงกว่าขอบของถ้วยใส่ตัวอย่างเล็กน้อย
2. วางถ้วยใส่ตัวอย่างลงในตลับใส่ตัวอย่าง

3. ใส่กลับใส่ตัวอย่างลงในช่องวัดตัวอย่างแล้วอ่านค่า วัด 2 ซ้ำโดยยกกลับใส่ตัวอย่างขึ้นและใส่ลงในช่องตัวอย่าง

5. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาตามวิธีของ Walker (1976)

เครื่องมือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, Joel JSM 5310, England)

2. แท่ง Aluminium stub ซึ่งติดเทปกาวสองหน้าชนิดบาง

3. เซนซิเตอร์ที่มีสารดูดความชื้น

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วใส่ในเซนซิเตอร์ รอจนกระทั่งเย็น

3. นำตัวอย่างแบ่งปริมาณเล็กน้อยมากระจายตัวบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่ง aluminium stub

4. นำแท่ง aluminium stub ที่ติดตัวอย่างแบ่งแล้วเข้าเครื่องเคลือบทองเพื่อเคลือบผิวของแท่งตัวอย่างซึ่งช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

5. ใส่แท่ง aluminium stub ที่ผ่านการเคลือบทองแล้วในช่องใส่ตัวอย่างภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายที่ 1,000 และ 3,000 เท่า

6. เลือกภาพของอนุภาคแบ่งที่ต้องการและบันทึกภาพดังกล่าวลงแผ่นซีดี

6. ขนาดโมเลกุลดัดแปลงจากวิธีของ Govindasamy *et al.* (1992)

เครื่องมือ

1. เครื่อง High-Performance Size-Exclusion Chromatography (Shimadzu, Japan)
2. เครื่อง sonicator (Vibra cell™, Sonics & Materials Inc., USA)
3. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic, 2210 Branson, USA)
4. หลอดแก้วปริมาตร 30 มิลลิลิตร
5. อ่างน้ำเดือด
6. ชุดกรอง Millipore filter และเยื่อแผ่นกรองชนิด Cellulose nitrate ขนาดรูพรุน 8 ไมครอน และ 0.45 ไมครอน

สารเคมี

สารละลายโซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 และ 1 M

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งแบ่งตัวอย่าง 0.04 กรัมใส่ลงในหลอดแก้ว เติมน้ำกลั่น 9 มิลลิลิตรเขย่าผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปเขย่าในน้ำเดือดเป็นเวลา 20 นาที
2. นำหลอดแก้วออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ ห้องแล้ว sonicate ด้วยเครื่อง sonicator โดยใช้ amplitude เท่ากับ 30 เป็นเวลา 18 วินาที
3. เติมสารละลายโซเดียมไนเตรทเข้มข้น 1 M ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน
4. กรองตัวอย่างผ่านเยื่อแผ่นกรองขนาดรูพรุน 8.0 ไมครอน แล้วนำมาวิเคราะห์โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของแป้งโดยใช้เครื่อง High-Performance Size-Exclusion Chromatography ซึ่งประกอบด้วยปั๊มรุ่น LC-10AT ควบคุมการไหลของวัฏภาคเคลื่อนที่ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมไนเตรทเข้มข้น 0.1 M ที่ผ่านการกรองด้วยเยื่อแผ่นกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน แล้วไล่อากาศด้วย

เครื่องอุตราโซนิก อัตราการไหลของวัฏภาคเท่ากับ 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ 3 คอลัมน์ต่อกันเป็นลำดับดังนี้ Ultrahydrogel linear, Ultrahydrogel 120 และ Ultrahydrogel 120 โดยควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ที่ 55 องศาเซลเซียส ใช้ดีเทคเตอร์ชนิด RID-10A ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 90 นาทีต่อตัวอย่าง ฉีดตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร ควบคุมปริมาตรด้วยเครื่อง Autoinjector ชนิด SIL-10A การทำงานของเครื่องควบคุมโดย CBM-10A ฟังก์ชันคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม Class-LC10

5. บันทึกลักษณะ chromatogram และระยะเวลาที่องค์ประกอบต่างๆถูกชะออกจากคอลัมน์ (retention time)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล : นางสาวศิริธร เลิศพานิช
ประวัติการศึกษา : วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ : มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย

