

วารสารปริทัศน์

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีชื่อเรียกทั่วไปว่า cassava ส่วนชื่อที่เรียกในภาษาอื่น ๆ มี yuca, manioc และ mandioca เมื่อนำมาทำเป็นแป้งเรียกว่า tapioca starch ส่วนชื่อวิทยาศาสตร์ที่ถือว่าถูกต้องและใช้ในปัจจุบัน คือ Manihot esculenta Crantz (8)

ลักษณะสำคัญทางกายภาพและเคมี

แป้งประกอบด้วยโมเลกุลโพลีแซคคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน อะไมโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์แบบสายตรงประกอบด้วย anhydroglucose unit (AGU) ประมาณ 200-2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) glucosidic สามารถดูดความชื้นและกระจายตัว (disperse) ในน้ำได้ เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลอะไมโลสจะละลายออกมาจากเม็ดแป้งและเมื่อเย็นตัวลงโมเลกุลอะไมโลสจะรวมตัวกัน โดยเมื่อสารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งน้อยการรวมตัวกันของอะไมโลสจะทำให้เกิดการตกตะกอน (precipitation) หรือถ้าสารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งมาก การรวมตัวกันของอะไมโลสจะทำให้เกิดเจล (gelling)

ส่วนอะไมโลเพคตินเป็นโพลีแซคคาไรด์แบบแยกเป็นสาขาแต่ละสาขาประกอบด้วย AGU 15-25 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1 \rightarrow 4) glucosidic ส่วนจุดที่แยกเป็นสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-(1 \rightarrow 6) glucosidic เนื่องจากอะไมโลเพคตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย ดังนั้นโอกาสที่โมเลกุลจะจับกันเองจะน้อยลง เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง แป้งเปียกที่ได้จะใส มีเสถียรภาพ เพราะเกิดการคินตัวน้อย (9)

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งธรรมชาติชนิดต่างๆ จะเห็นว่า

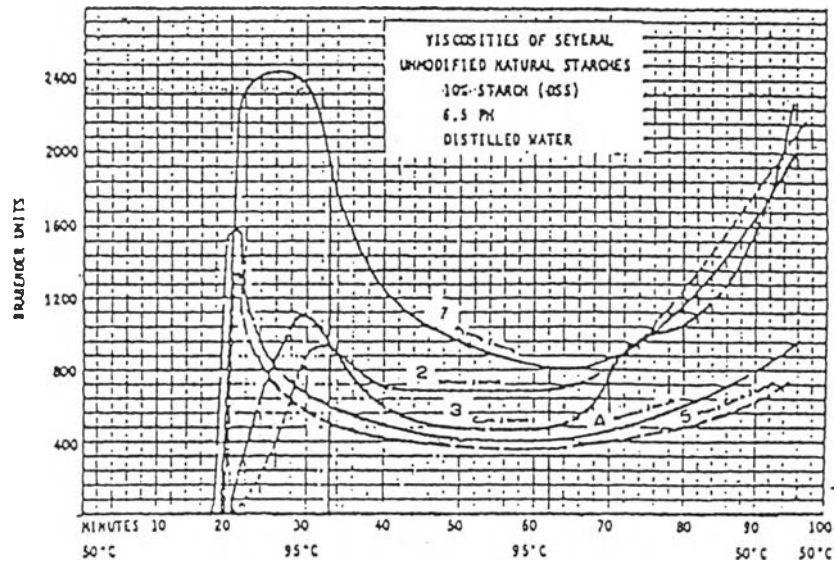
แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติประกอบด้วย อะไมโลสเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 17 มีน้ำหนักโมเลกุลของ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน ประมาณ 2.10×10^5 และ 3.0×10^5 ตามลำดับ (10) เม็ดแป้งมีขนาดเป็นรูปกลม - ไข่ ปลายด้านหนึ่งเป็นรอยตัด ขนาดของเม็ดอยู่ในช่วง 5 - 35 ไมครอน แต่ขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 20 ไมครอน

แป้งมันสำปะหลังธรรมชาติมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature range) เท่ากับ 52 - 64 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 2.1) ในช่วงนี้เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำ และเกิดการพองตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการสุกของแป้ง (gelatinization) ความหนืดของแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดความหนืดสูงสุด (peak viscosity) (รูปที่ 2.1) เมื่อให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่จะมีพันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างอยู่จะมีกำลังอ่อนที่สุด เมื่อได้รับความร้อนและการกวนต่อ โครงสร้างเม็ดแป้งจะ break down ได้ง่ายทำให้ความหนืดของแป้งเปียกลดลงมาก แต่ในช่วงรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ความหนืดจะลดลงเล็กน้อย ส่วนในช่วง cooling ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีกเนื่องจากเกิดการคืนตัวของแป้ง ส่วนแป้งข้าวโพดมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลเท่ากับ 62-72 องศาเซลเซียส เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณอะไมโลสมาก พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งจึงทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นความหนืดของแป้งเปียกจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดความหนืดสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส เมื่อให้ความร้อนและกวนต่อไป เม็ดแป้งจะเกิดการ break down น้อยเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังและในช่วง cooling แป้งข้าวโพดจะเกิดการคืนตัวมาก ทำให้ความหนืดในช่วงนี้เพิ่มขึ้นมาก

โดยทั่วไปแป้งจากพืชจำพวกหัวเช่น แป้งมันสำปะหลัง จะเกิดการคืนตัวน้อยกว่าแป้งจากธัญพืช เช่นแป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลส น้อย ดังนั้นแนวโน้มที่อะไมโลสจะรวมตัวกันเองและรวมกับอะไมโลเพคตินมีน้อย สำหรับแป้ง waxy maize มีปริมาณอะไมโลสประมาณร้อยละ 1.0 จะเกิดการคืนตัวน้อยมาก (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งธรรมชาติชนิดต่าง ๆ (11)

Starch	Granule size		Amylose (%)	Swelling power (at 95°C)	Solubility at 95°C (%)	Gelatinization range (°C)	Source	Taste	General description of granules
	Range	Average							
Barley	2-35	20	22	—	—	59-64	Cereal	Low	Round, elliptical
Com									
regular	5-25	15	26	24	25	62-72	Cereal	Low	Round, polygonal
waxy	5-25	15	~1	64	23	63-72	Cereal	Low	Round, oval indentations
high amylose	—	15	up to 80	6	12	85-87	Cereal	Low	Round
Potato	15-100	33	24	1000	82	56-69	Tuber	Slight	Egg-like, oyster indentations
Rice	3-8	5	17	19	—	61-78	Cereal	Low	Polygonal clusters
Rye	2-35	—	23	—	—	57-70	Cereal	Low	Elliptical, lenticular
Sago	20-60	—	27	97	—	60-72	Pith	Low	Egg-like, some truncate forms
Sorghum	5-25	15	26	22	22	68-75	Cereal	Low	Round, polygonal
Tapioca (cassava)	5-35	20	17	71	48	52-64	Root	Fruity	Round-oval, truncated on side
Wheat	2-35	—	25	21	41	62-75	Cereal	Low	Round, elliptical
Oats	—	25	27	—	—	—	Cereal	Low	Round



รูปที่ 2.1 กราฟ Brabender ของแป้งธรรมชาติชนิดต่าง ๆ

1. แป้งมันฝรั่ง
2. แป้งสาลี
3. แป้งข้าวโพด
4. แป้งมันสำปะหลัง
5. แป้ง waxy corn (12)

ตารางที่ 2.2 Characteristics of Gelatinized and Cooled Starch Dispersions (11)

Starch	Hot-paste viscosity	Texture	Clarity	Stability to retrograde
Corn	Medium	Short-stiff	Opaque	Low
Waxy maize	Medium-high	Soft-cohesive	Clear	High
Potato	Very-high	Long-cohesive	Clear	Medium
Rice	Medium-low	Short-stiff	Slightly opaque	Low
Sago	Medium-high	Long-cohesive	Clear-translucent	Medium
Tapioca	High	Long-cohesive	Clear-translucent	Medium
Wheat	Medium-low	Soft-short	Slightly opaque	Low

2.2 การดัดแปรแป้ง (Modification of Starch)

แป้งเป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวกับน้ำได้ดี และนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญ และมีสมบัติหลายประการที่มีประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์อาหาร โดยแป้งจะมีหน้าที่ต่าง ๆ กันดังนี้ คือ เป็นตัวช่วยให้อาหารข้นขึ้น เช่นในผลิตภัณฑ์ซอส ชุป ไล้ฉ่าย เป็นตัวช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว เช่นในผลิตภัณฑ์สลัด เป็นตัวช่วยให้ส่วนผสมจับกันได้ดี (binding agent) และเป็นตัวเพิ่มความชื้นในน้ำตาล icing (1,9) เป็นต้น ดังนั้นแป้งที่เติมลงไปในการช่วยเพิ่มลักษณะปรากฏเนื้อสัมผัส และรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น แต่ในกระบวนการผลิตอาหารอาจต้องผ่านขั้นตอนการให้ความร้อนสูง ซึ่งมีผลให้พันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งอ่อนตัวลง เมื่อเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่จึงอาจเกิด break down ทำให้ความหนืดลดลงได้ สำหรับแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติเมื่อได้รับความ

ร้อนจะสูงกว่า (gelatinization temperature อยู่ในช่วง 52 - 64 องศาเซลเซียส) มีการพองตัวอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่เม็ดแป้งจะ break down สูงมาก (รูปที่ 2.1) ทำให้แป้งเปียกเหลว แต่แป้งเปียกที่ได้จะใส และเกิดการคืนตัวต่ำ (ตารางที่ 2.2)

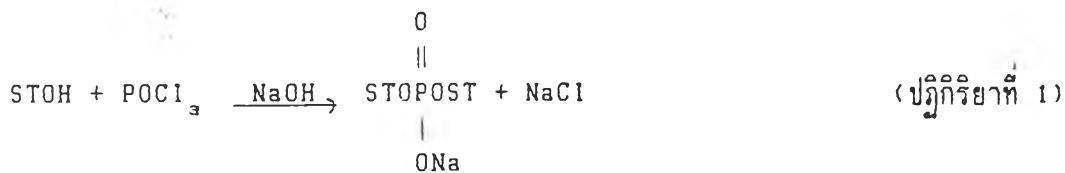
การตัดแปรแป้งโดยวิธีทางเคมีสามารถช่วยควบคุมความหนืด การละลาย กำลังการพองตัว การคืนตัวของแป้ง และอื่น ๆ ได้ เช่นการตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยา cross-linking จะช่วยเสริมโครงสร้างของเม็ดแป้งให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งสามารถทนความร้อน การผสมที่รุนแรง และ/หรือภาวะที่เป็นกรด ส่วนการตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยา oxidation จะทำให้แรงยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งน้อยลง ช่วงอุณหภูมิแป้งสุกลดลง แป้งละลายน้ำได้ง่ายขึ้น แป้งเปียกจะใสและเกิดการคืนตัวน้อย (6,7) การตัดแปรแป้งข้าวโพดธรรมชาติด้วยปฏิกิริยา cross-linking และ oxidation (7) จะได้แป้งข้าวโพดตัดแปรที่มีความหนืดที่ต้องการและเสถียรใน heating - cooling cycle ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังธรรมชาติด้วยปฏิกิริยา cross - linking และ oxidation เพื่อให้ได้แป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่มีความหนืดที่ต้องการและเสถียรใน heating - cooling cycle

2.2.1 การตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยา cross - linking

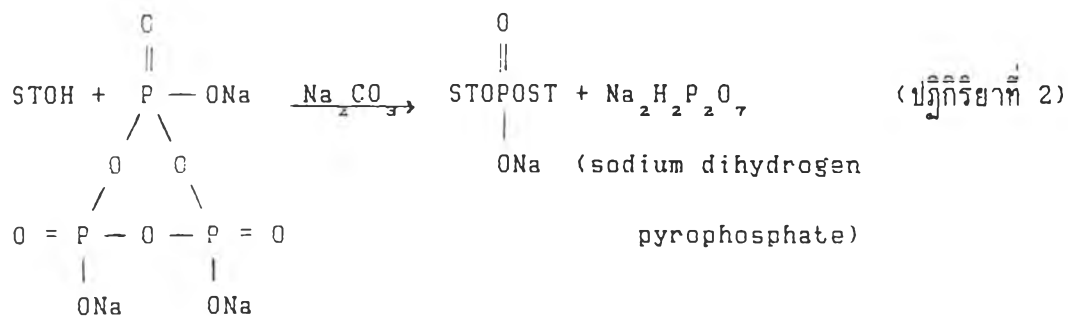
การตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยา cross - linking เป็นการสร้างพันธะเชื่อมขวาง (cross - linking) ชนิดโคเวเลนต์ระหว่างโมเลกุลแป้งสองสาย (5,13) จึงทำให้ช่วยเสริมโครงสร้างของเม็ดแป้งให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ความหนืดของแป้งเปียกมีเสถียรภาพดีขึ้นในภาวะการผลิตที่ใช้ความร้อน มีการผสมรุนแรง และ/หรือมีภาวะที่เป็นกรด

สารเคมีที่ใช้ในการสร้างพันธะเชื่อมขวางที่ใช้กันมากคือ phosphorus oxychloride (POCl_3), sodium trimetaphosphate ($\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$), epichlorohydrin ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OCl}$), adipic-acetic anhydride ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_6$) ดังปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 2.2 และแป้งเชื่อมขวางที่ใช้ในอาหารต้องมีสมบัติตามข้อกำหนดดังตารางที่ 2.3

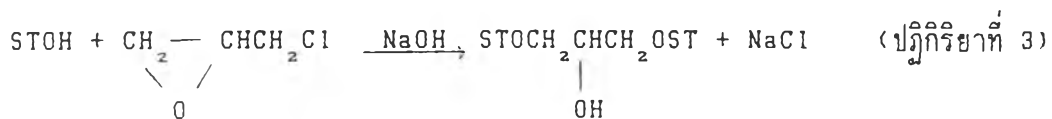
Phosphorus Oxychloride :



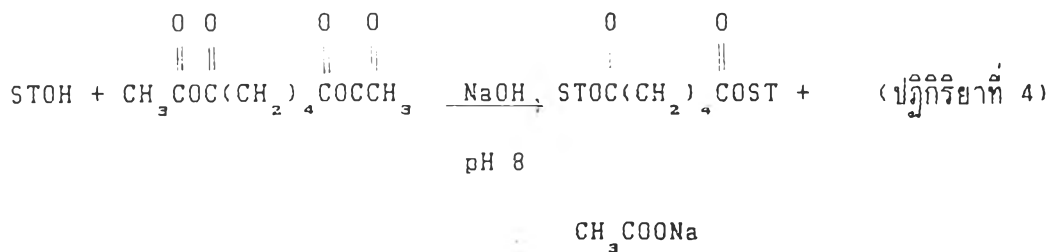
Sodium Trimetaphosphate :



Epichlorohydrin :



Adipic - Acetic Anhydride :



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยา cross-linking โมเลกุลแป้ง (5)

ตารางที่ 2.3 ประเภทแป้งตัดแปรซึ่งเกิดการเชื่อมขวางที่อนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนใน
อาหาร (3,4)

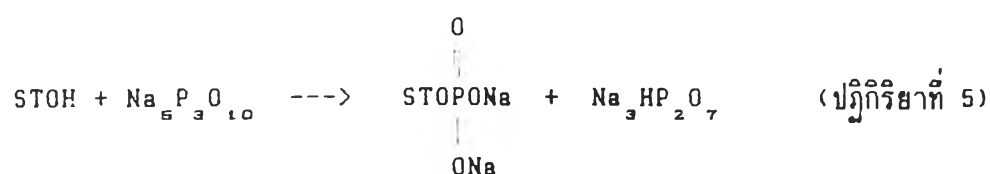
ประเภทแป้งตัดแปร	สารเคมีที่ใช้	ข้อกำหนด
อะเซทิลเลตไดสตาร์ชอะดิเปต (acetylated distarch adipate)	acetic anhydride และ adipic anhydride ไม่เกิน ร้อยละ 0.12	หมู่อะเซทิลไม่เกินร้อยละ 2.5 และหมู่อะดิเปต ไม่เกินร้อยละ 0.135
ไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate)	sodium trimetaphosphate หรือ phosphorus oxychloride	ฟอสเฟตตกค้างคำนวณในรูป ฟอสฟอรัส ไม่เกินร้อยละ 0.04
ไดสตาร์ชกลีเซอรอล (distarch glycerol)	epichlorohydrin ไม่เกิน ร้อยละ 0.3	

การตัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยา cross - linking อาจเกิดจากปฏิกิริยาประเภท esterification หรือปฏิกิริยาประเภท etherification (9) การสร้างพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลแป้งด้วย epichlorohydrin จะเป็นปฏิกิริยาประเภท etherification ซึ่งจะได้แป้งไคสตาร์ชกลีเซอรอล (14) แต่อนุพลคลอโรไฮดรินที่ตกค้างในแป้งไคสตาร์ชกลีเซอรอลพบว่าเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง (15) ดังนั้นในปัจจุบันจึงไม่นิยมใช้แป้งไคสตาร์ชกลีเซอรอลในอุตสาหกรรมอาหาร

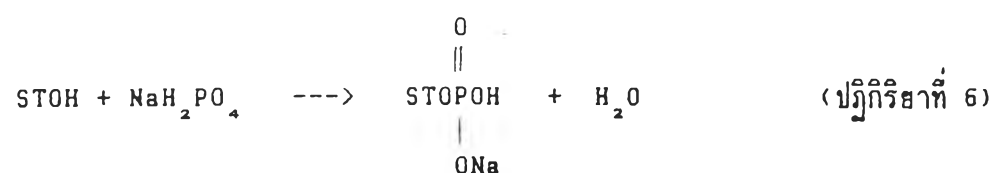
การตัดแปรแป้งสร้างด้วยสารพวกฟอสเฟตจะเกิดปฏิกิริยาประเภท esterification ได้แป้งตัดแปร 2 ชนิด คือแป้งโมโนสตาร์ชฟอสเฟต และแป้งไคสตาร์ชฟอสเฟต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารฟอสเฟตที่ใช้และภาวะที่เกิดปฏิกิริยา (16)

แป้งโมโนสตาร์ชฟอสเฟตเป็นแป้งตัดแปรด้วยสารพวก ortho, pyro หรือ tripolyphosphoric acid เกิดปฏิกิริยาประเภท esterification ระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งกับกลุ่มกรดฟอสฟอริก (ปฏิกิริยาที่ 5 และปฏิกิริยาที่ 6) (17) ได้แป้งโมโนสตาร์ชฟอสเฟต หรือแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ส่วนแป้งไคสตาร์ชฟอสเฟตเป็นแป้งตัดแปรด้วย phosphorus oxychloride หรือ sodium trimetaphosphate เกิดเป็นพันธะฟอสเฟตไดเอสเทอร์ ได้แป้งไคสตาร์ชฟอสเฟต หรือแป้งฟอสเฟตไดเอสเทอร์ (ปฏิกิริยาที่ 1-2)

Sodium Tripolyphosphate :

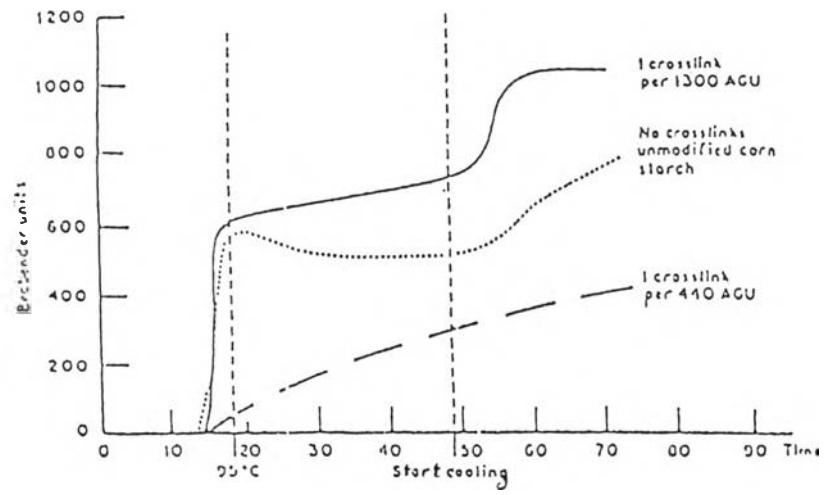


Sodium Orthophosphate :

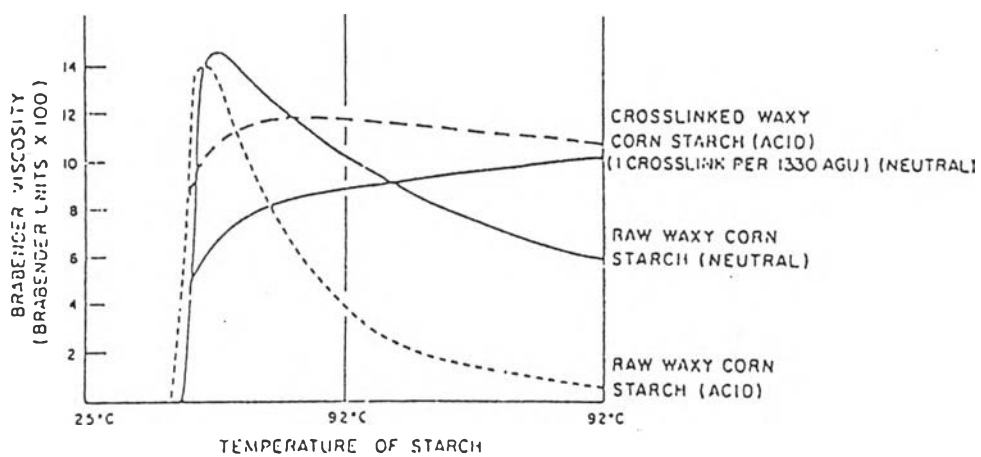


แป้งที่มีระดับการเชื่อมขวางต่างกันจะมีสมบัติของแป้งเปียกใน heating - cooling cycle แตกต่างกัน (5) จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าการสร้างพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลแป้งข้าวโพดที่ระดับ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 1,300 AGU มีผลต่ออัตราการเกิด gelatinization เริ่มต้นเพียงเล็กน้อย แต่มีผลให้ความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น และไม่ลดลงในช่วงรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส ส่วนที่ระดับ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 440 AGU มีผลให้ความหนืดลดลงมากกว่าแป้งข้าวโพดธรรมชาติ เพราะการจำกัดการพองตัวของเม็ดแป้งมีมากขึ้น ที่ระดับ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 100 AGU เม็ดแป้งจะรัดตัวมากทำให้ไม่เกิดการพองตัวและไม่เป็นเจล

การสร้างพันธะเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลแป้งจะเป็นผลดีโดยเฉพาะกับแป้งชนิด waxy และแป้งที่ได้จากรากหรือหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง เป็นต้น (18) เนื่องจากแป้งธรรมชาติเหล่านี้ไวต่อความร้อนและกรด แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) ที่มีระดับการเชื่อมขวาง 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 1,330 AGU (รูปที่ 2.4) จะทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้สามารถทนต่อภาวะที่เป็นกรด และสามารถทนต่อความร้อนได้



รูปที่ 2.3 กราฟ Brabender ของแป้งข้าวโพดธรรมชาติและแป้งข้าวโพดเชื่อมขวาง
 วัตถุประสงค์ความเข้มข้นร้อยละ 6 pH 5 (5)

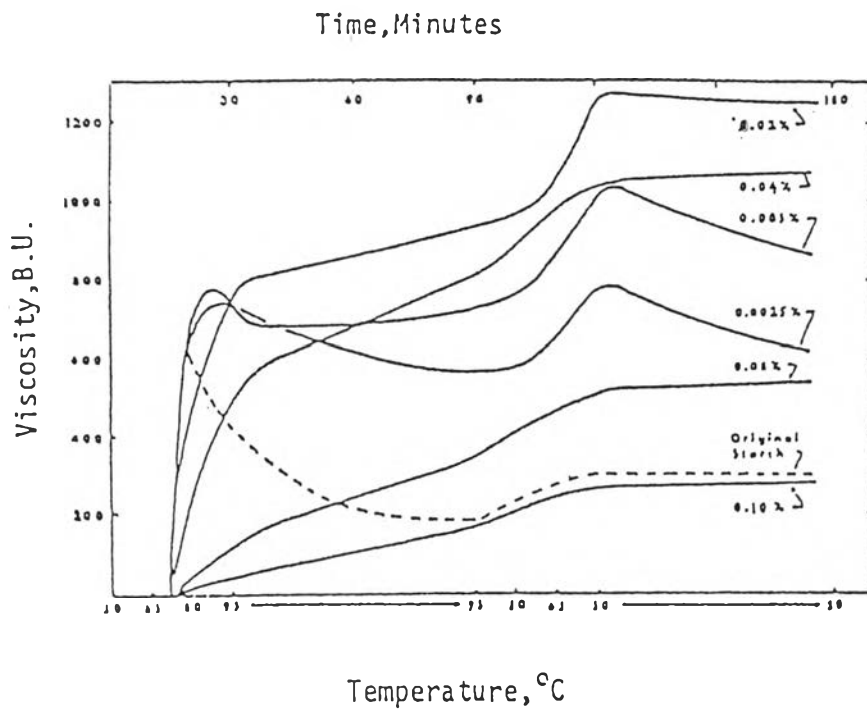


รูปที่ 2.4 กราฟ Brabender ของแป้ง waxy cornธรรมชาติ และแป้ง waxy corn
เชื่อมขวางที่ pH 3 และ 5 (18)

ปัจจัยที่มีผลต่อแป้งซึ่งตัดแปรด้วยปฏิกิริยา cross-linking โดยใช้ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อแป้งซึ่งตัดแปรด้วยปฏิกิริยา cross-linking ได้แก่ ความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ เวลา อุณหภูมิ และ pH

Kite (15) ได้ตัดแปรแป้ง waxy sorghum ด้วยปฏิกิริยา cross-linking โดยใช้ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ที่ระดับต่าง ๆ ที่ภาวะสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 40 (น้ำหนักแป้งแห้ง) ที่ pH 10.00 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าแป้ง waxy sorghum ที่ตัดแปรด้วย $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ที่ระดับความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.0025-0.0050 แป้ง waxy sorghum ตัดแปรจะมี peak viscosity สูงขึ้น และความหนืดมีการลดลงเล็กน้อยในช่วง heating เมื่อเทียบกับแป้ง waxy sorghum ธรรมชาติ (รูปที่ 2.5) แต่ที่ระดับความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.02 - 0.10 แป้ง waxy sorghum ตัดแปรจะให้ความหนืดเสถียรลงในช่วง heating โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไม่มีการ break down ของแป้งเปียกในช่วงนี้ ทั้งนี้ระดับความหนืดจะลดลงตามปริมาณของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$

Srijesdark และ คณะ (19) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ต่อคุณภาพของแป้งมันฝรั่งธรรมชาติ (*Solanum tuberosum* var. *spunta*) โดยการตัดแปรแป้งมันฝรั่งที่ภาวะสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 40 (น้ำหนักแป้งแห้ง) pH 11.00 + 0.10 อุณหภูมิ 40 + 2 องศาเซลเซียส และ 50 + 2 องศาเซลเซียส เวลาของปฏิกิริยา 4 และ 6 ชั่วโมง และที่ระดับความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ ร้อยละ 0.20 และ 0.30 (น้ำหนักแป้งแห้ง) และรายงานว่ามีอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$ เพิ่มขึ้นมีผลให้ความหนืดของแป้งเปียกที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และค่าการคืนตัวของแป้งสุกจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แป้งมันฝรั่งตัดแปรที่ได้จะมีอุณหภูมิแป้งสุกสูงกว่าของแป้งมันฝรั่งธรรมชาติ เนื่องจากเม็ดแป้งมีพันธะฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งจึงลดลง

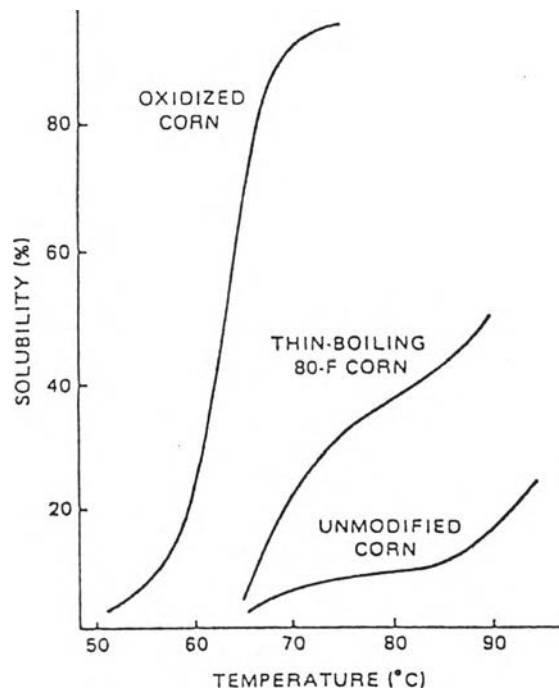


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเปียกใน heating-cooling cycle ของแป้ง waxy sorghum ชลรมชาติ และแป้ง waxy sorghum เชื่อมขวางที่ระดับความเข้มข้นของ $\text{Na}_3\text{P}_2\text{O}_7$ ร้อยละ 0.0025-0.1000 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) (15)

2.2.2 การตัดแปรงด้วยปฏิกิริยา oxidation

การตัดแปรงด้วยปฏิกิริยา oxidation จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของโมเลกุลแปรงเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) (6,7) มีผลทำให้สายโพลีเมอร์สูญเสียลักษณะของสายตรง (linearity) ดังนั้นแรงยึดของโครงสร้างเม็ดแปรงจะน้อยลง แปรงตัดแปรงชนิดนี้จะมีอุณหภูมิแปรงต่ำกว่าแปรงธรรมชาติชนิดอื่นๆ และสามารถละลายน้ำได้ง่ายขึ้น แปรงเปียกจะใสและเกิดการคืนตัวต่ำ รูปที่ 2.6 แสดงการละลาย (solubility) ของแปรงข้าวโพดธรรมชาติ แปรงข้าวโพดออกซิไดซ์ และแปรงข้าวโพดที่ถูกย่อยสลายด้วยกรด จะเห็นว่าที่อุณหภูมิเท่ากัน แปรงข้าวโพดธรรมชาติจะละลายน้ำได้น้อยกว่าแปรงตัดแปรงทั้งสองชนิด โดยแปรงข้าวโพดออกซิไดซ์จะมีการละลายดีที่สุด

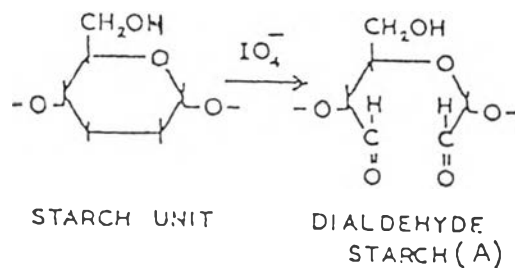
ในปัจจุบันแปรงออกซิไดซ์ที่สำคัญทางการค้าจะเตรียมโดยใช้ปฏิกิริยา oxidation ด้วย hypochlorite (OCl^-) (5,6) และ periodate (IO_4^-) (6) ในระบบที่เป็นด่าง



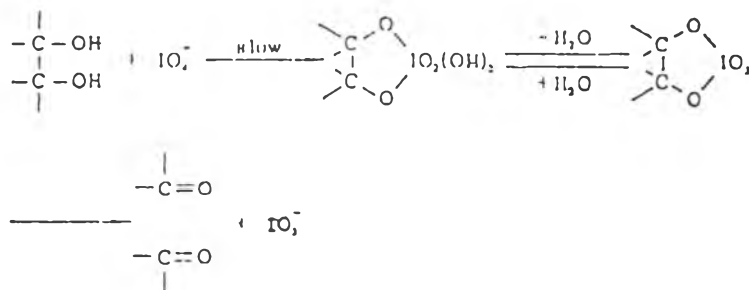
รูปที่ 2.6 การละลายของแป้งข้าวโพดธรรมชาติ แป้งข้าวโพดออกซิไดซ์ และแป้งข้าวโพด
ที่ตกย่อยสลายด้วยกรด (11)

2.2.2.1 การตัดแปร่งโดยใช้ periodate

การตัดแปร่งด้วย periodate ในระบบที่เป็นค่า่าง periodate จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C₂ และ C₃ (20) ทำให้พันธะคาร์บอนและคาร์บอนแตกออกและได้แปร่งไดอัลดีไฮด์ (dialdehyde starch) (โครงสร้าง A ปฏิกิริยาที่ 7) การแตกออกของพันธะคาร์บอนและคาร์บอนจะเกิดผ่าน cyclic ester mechanism (ปฏิกิริยาที่ 8)

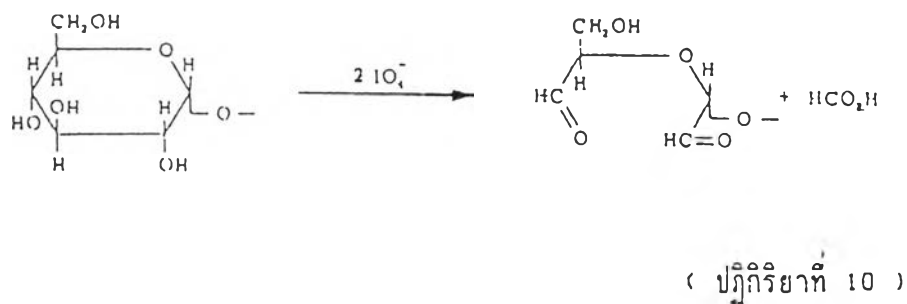
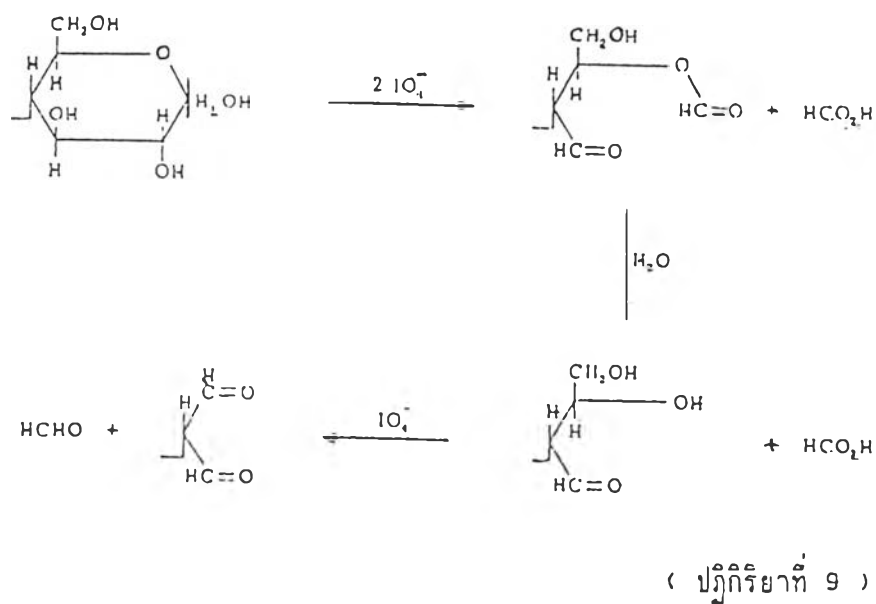


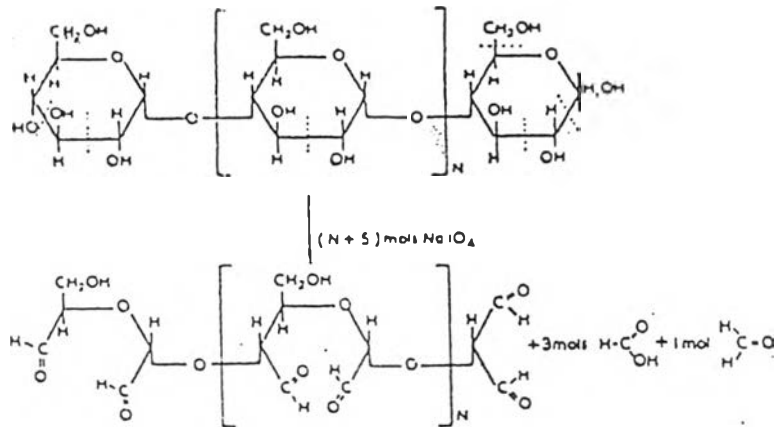
(ปฏิกิริยาที่ 7)



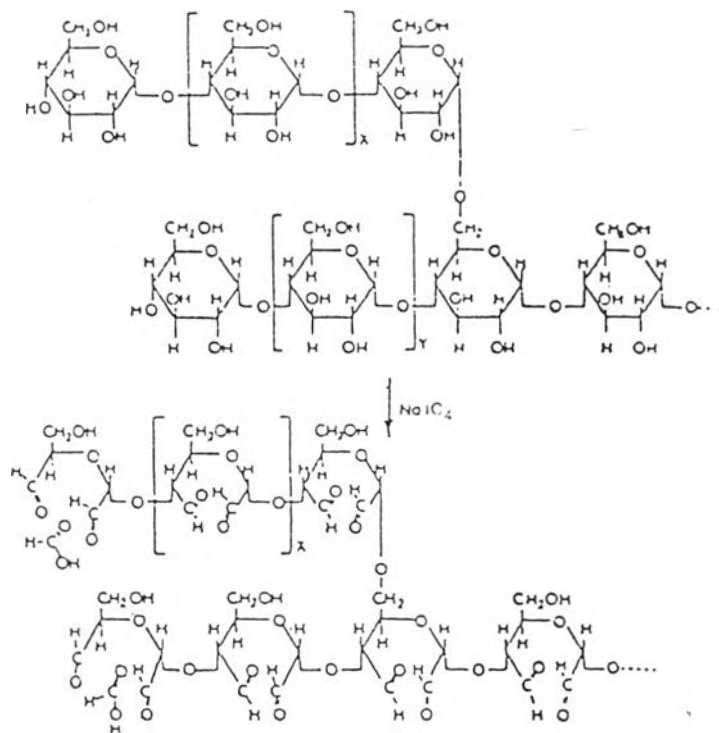
(ปฏิกิริยาที่ 8)

สำหรับหน่วยกลูโคสที่อยู่ตำแหน่งปลายสุดของสายโพลีเมอร์ พบว่าเมื่อ periodate ทำปฏิกิริยากับหน่วย reducing end จะได้กรด formic 2 โมล และ formaldehyde 1 โมล (ปฏิกิริยาที่ 9) แต่ถ้า periodate ทำปฏิกิริยากับหน่วย non-reducing end จะได้กรด formic 1 โมล (ปฏิกิริยาที่ 10) ดังนั้นเมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยา oxidation ของอะไมโลส 1 โมเลกุลด้วย periodate จะได้ผลดังรูปที่ 2.7 ส่วนปฏิกิริยา oxidation ของอะไมโลเพคตินด้วย periodate จะได้ผลดังรูปที่ 2.8





รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยา oxidation ของโมเลกุลอะไมโลสด้วย periodate (21)

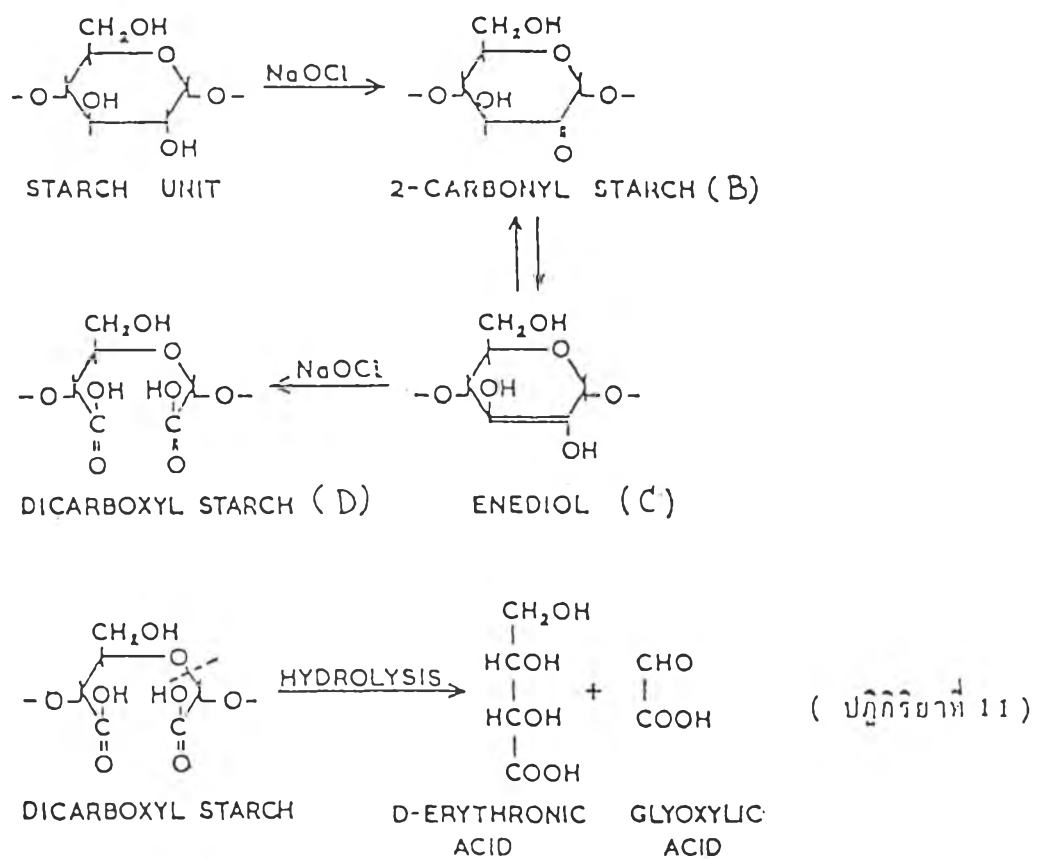


รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยา oxidation ของโมเลกุลอะไมโลเพคตินด้วย periodate (21)

2.2.2.2 การตัดแปรงโดยใช้ hypochlorite

การตัดแปรงโดยการออกซิไดซ์ด้วย hypochlorite ในระบบที่เป็นด่าง (pH 8-10) hypochlorite จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C_2 และ C_3 (13,22) โดยตอนแรก hypochlorite จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C_2 ได้ 2-carbonyl starch (โครงสร้าง B รูปที่ 2.9) จากนั้นเกิดปฏิกิริยา enolization ได้ enediol (โครงสร้าง C รูปที่ 2.6) hypochlorite จะเข้าทำปฏิกิริยากับ enediol อีก ทำให้พันธะคาร์บอนและคาร์บอน ระหว่างตำแหน่ง C_2 และ C_3 แตกออก และได้แปรงไดคาร์บอกซิล (โครงสร้าง D รูปที่ 2.9)

ถ้านำแปรงไดคาร์บอกซิลไป hydrolyze จะได้กรด glyoxylic และกรด D-erythronic (ปฏิกิริยาที่ 11 รูปที่ 2.9) ปริมาณคาร์บอกซิลในแปรงไดคาร์บอกซิลสามารถตรวจสอบจากปริมาณกรด glyoxylic และกรด D-erythronic



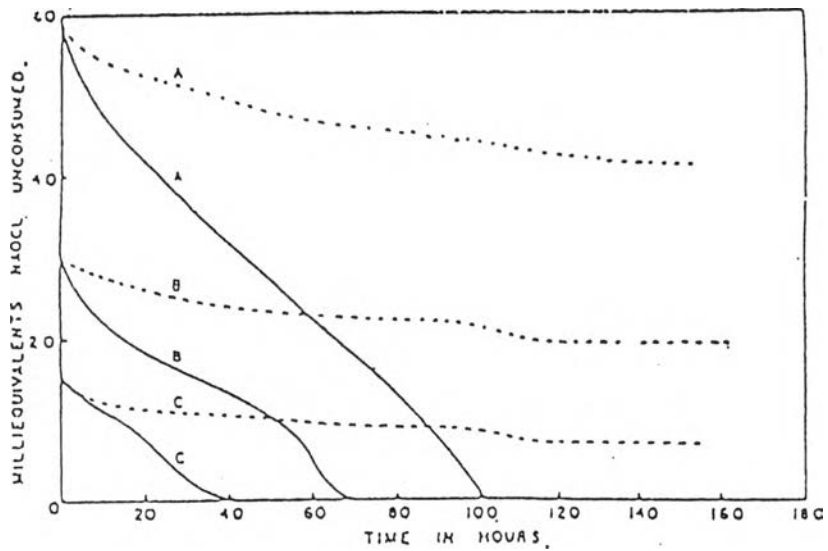
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยา oxidation ของโมเลกุลแป้งด้วย NaOCl ในระบบที่เป็นค่า (6)

ปัจจัยที่มีผลต่อแป้งที่ตัดแปรด้วยปฏิกิริยา oxidation โดยใช้ NaOCl

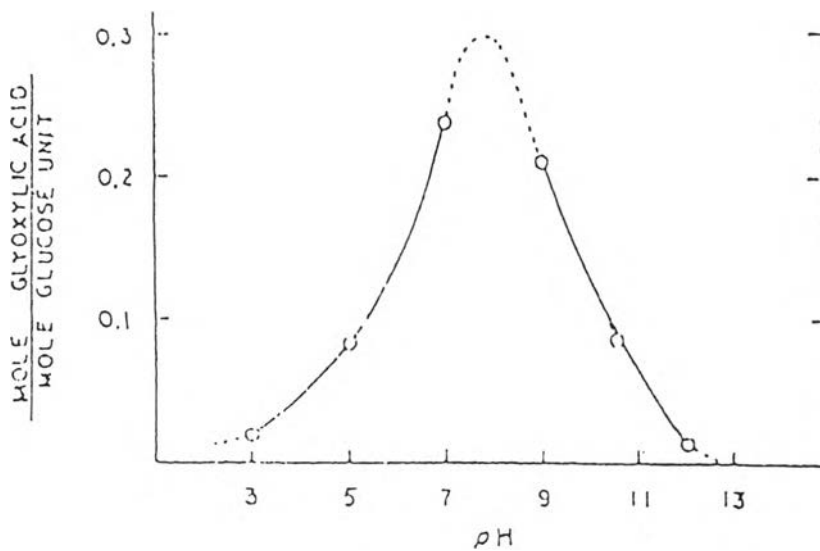
ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดแปรด้วยปฏิกิริยา oxidation โดยใช้ NaOCl ได้แก่ ความเข้มข้นของ NaOCl เวลา และ pH

Whistler และคณะ (13) ได้ตัดแปรอะไมโลสจากแป้งข้าวโพดด้วย NaOCl ภาวะที่ทำการทดลองคือ pH 9.00 และ 11.00 ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณ NaOCl ที่ใช้เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 equivalent ต่อ AGU เมื่อ hydrolyze แป้งข้าวโพดที่ตัดแปรแล้วและนำไปวิเคราะห์กรด glyoxylic และกรด D-erythronic พบว่าปฏิกิริยา oxidation เกิดได้มากขึ้นเมื่อใช้ NaOCl เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณกรด glyoxylic มีค่ามากขึ้น แสดงว่าแป้งข้าวโพดตัดแปรที่มีปริมาณคาร์บอนซิลในโมเลกุลเพิ่มขึ้น และปฏิกิริยา oxidation จะเกิดที่ pH 9.00 จะเกิดได้เร็วและสมบูรณ์กว่าที่ pH 11.00 (รูปที่ 2.10)

Whistler และ Schweiger (22) ได้ศึกษาผลของ pH ต่อการตัดแปรอะไมโลเพคตินจากแป้งข้าวโพดธรรมชาติด้วย NaOCl ภาวะที่ทำการทดลองคือ pH ในช่วง 3.00-13.00 ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาณ NaOCl ที่ใช้เท่ากับ 3 โมลต่อ AGU 1 โมล พบว่าปฏิกิริยา oxidation จะเกิดได้ดีที่ pH ใกล้เคียง 7.00 เมื่อ hydrolyze แป้งที่ถูกตัดแปรแล้วนำไปวิเคราะห์กรด glyoxylic และกรด D-erythronic พบว่าแป้งข้าวโพดตัดแปรที่ pH ใกล้เคียง 7.00 จะมีปริมาณกรด glyoxylic และกรด D-erythronic มากที่สุด (รูปที่ 2.11)



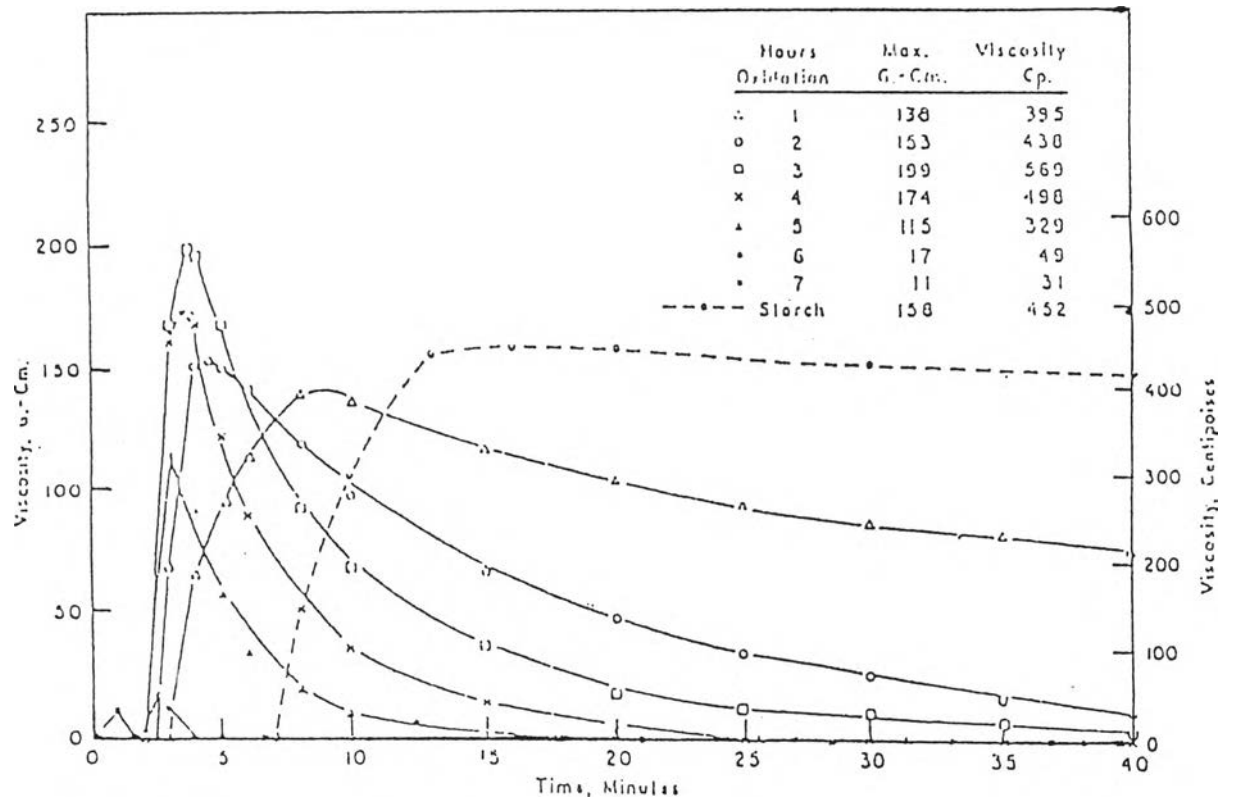
รูปที่ 2.10 ปริมาณ NaOCl ที่ใช้ในการคลอรีนโมลจากแป้งข้าวโพดที่เวลาต่าง ๆ ที่ pH 9.0 (—) และ pH 11.0 (-----) ปริมาณ NaOCl (equivalent) ต่อ AGU คือ A (2.0) B (1.0) และ C (0.5) (13)



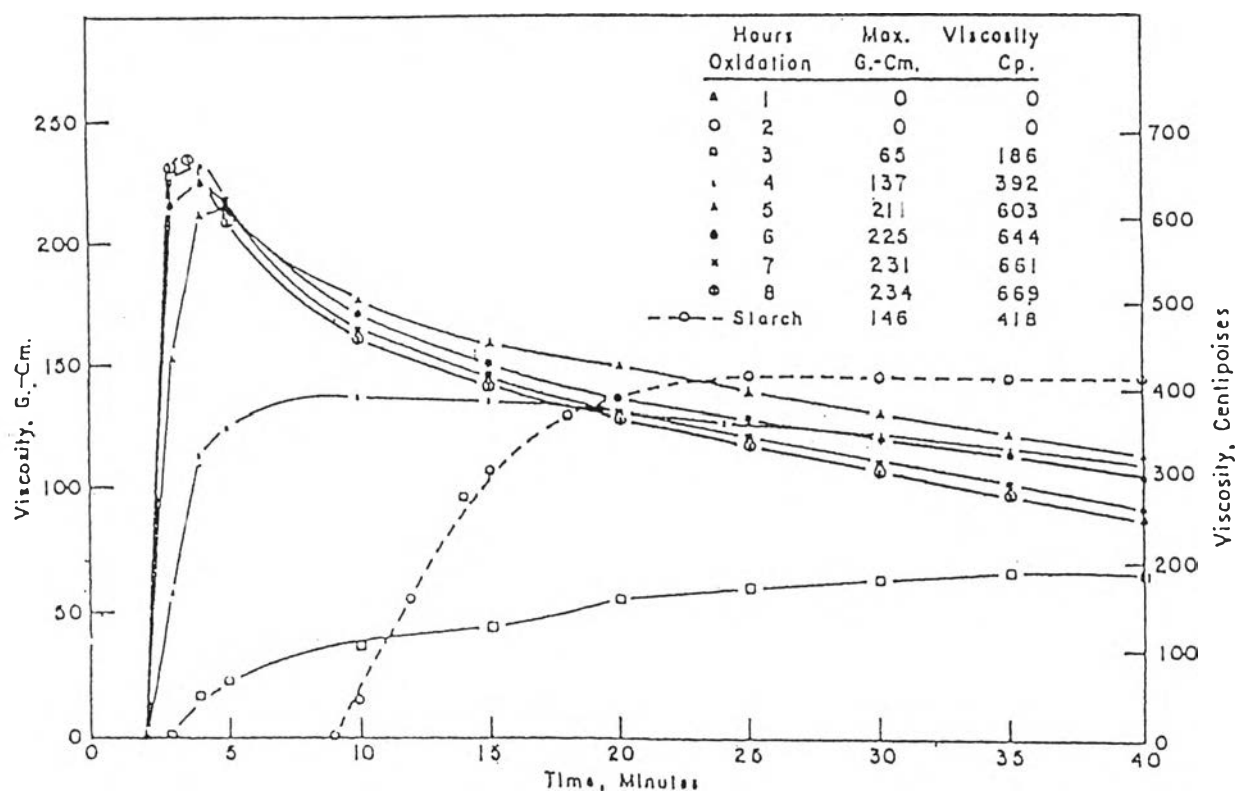
รูปที่ 2.11 ปริมาณกรด glyoxylic จากการ hydrolyze แป้งที่อุณหภูมิไอซ์ที่ pH ต่าง ๆ (22)

การตัดแปรแบงก์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ล้วนเป็นการตัดแปรโดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่ง ซึ่งในการตัดแปรแบงก์ไม่จำเป็นต้องตัดแปรโดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเท่านั้น อาจจะใช้หลาย ๆ วิธีร่วมกันก็ได้ ซึ่งจะมีผลคือ แบงก์ตัดแปรที่ได้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดียิ่งขึ้น

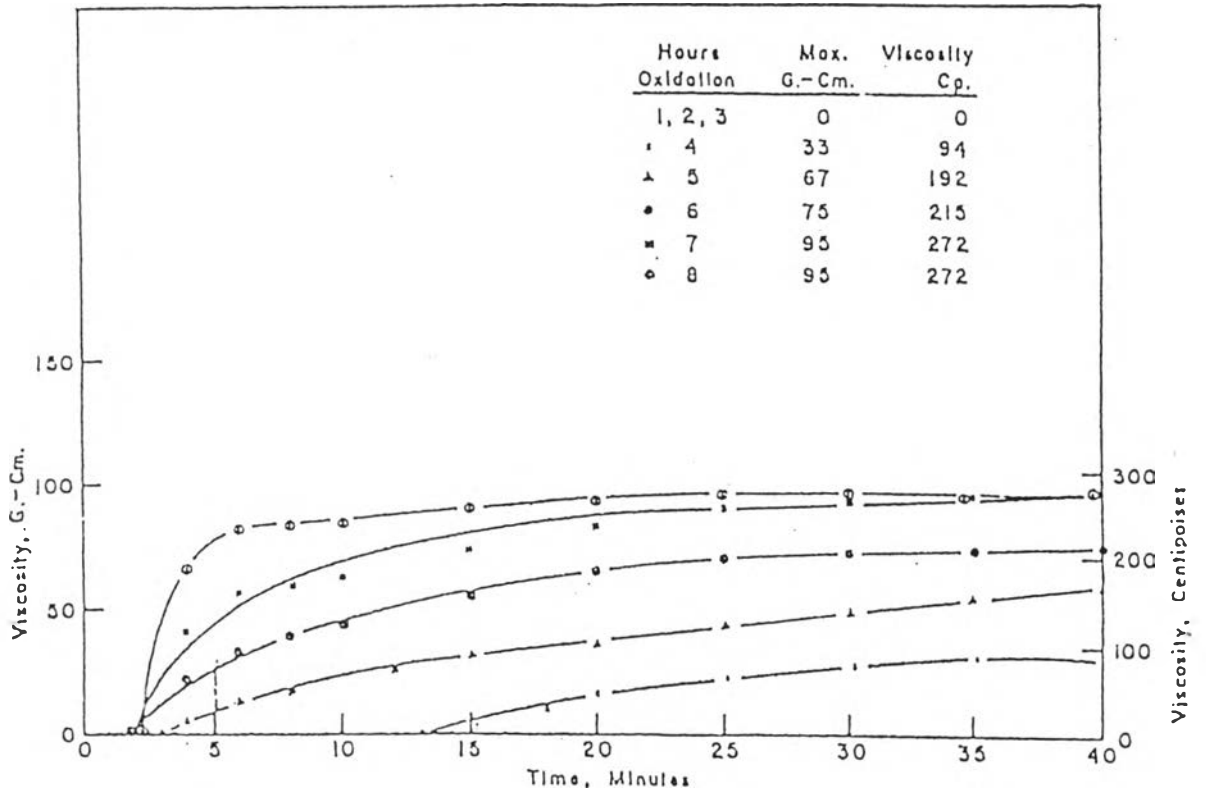
Senti และคณะ(7) ได้ศึกษาการตัดแปรแบงก์ข้าวโพดธรรมชาติด้วยปฏิกิริยา cross - linking โดยใช้ epichlorohydrin ในครั้งแรก แล้วจึงตัดแปรอีกครั้งด้วยปฏิกิริยา oxidation โดยใช้ NaOCl พบว่าระดับของพันธะเชื่อมขวางของแบงก์ตัดแปรคือ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 1000 AGU , 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 250 AGU และ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 175 และ 150 AGU จะมีผลต่อคุณภาพสุดท้ายของแบงก์ตัดแปรที่ได้หลังจากทำการ oxidize แล้ว (รูปที่ 2.12 - 2.15) โดยแบงก์ข้าวโพดที่มีระดับพันธะเชื่อมขวางปานกลางคือ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 250 AGU และแบงก์ข้าวโพดที่มีระดับพันธะเชื่อมขวางสูงคือ 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 175 และ 150 AGU เมื่อตัดแปรด้วย NaOCl โดยเลือกใช้เวลาในการ oxidize ที่เหมาะสม จะได้แบงก์ข้าวโพดตัดแปรที่มีความหนืดที่ต้องการและเสถียร



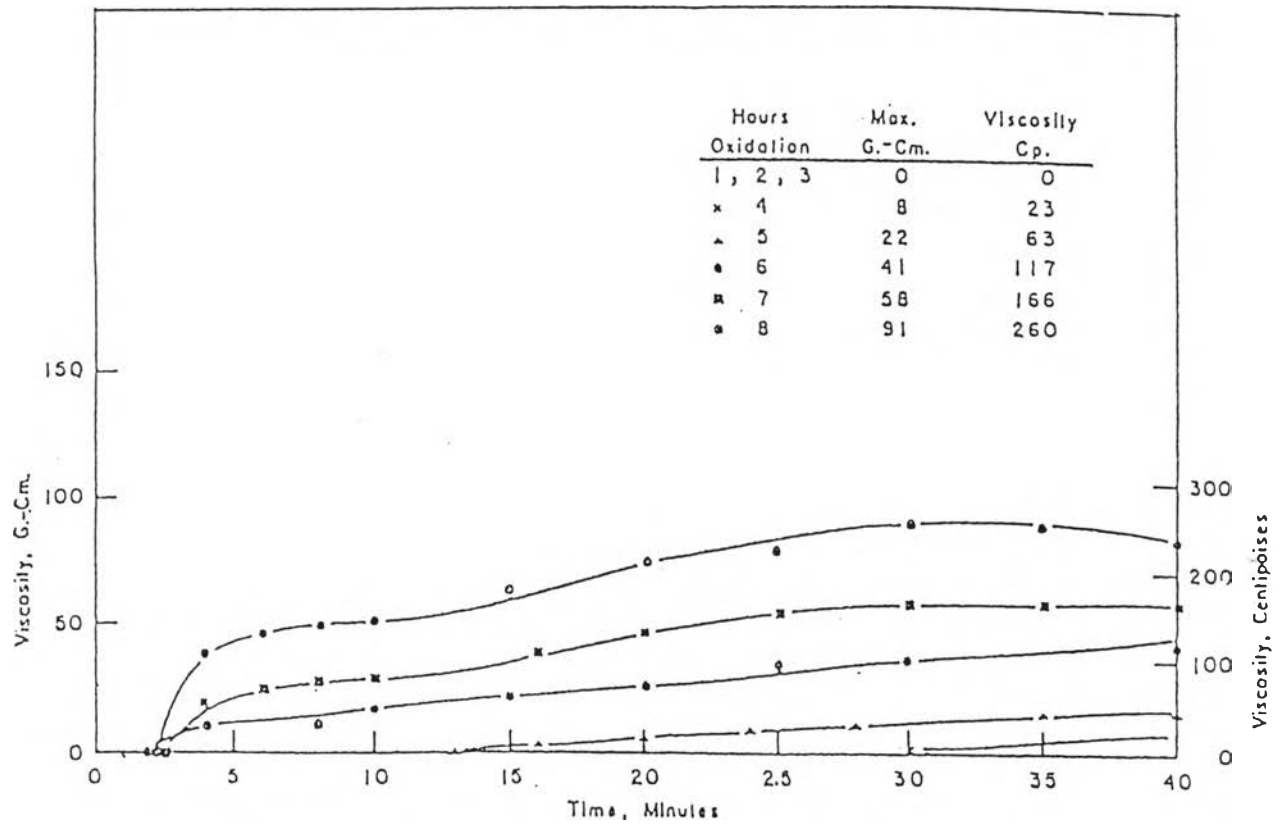
รูปที่ 2.12 ความหนืดของแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพดตัดแปรโดยการสร้างพันธะเชื่อมขวาง ที่ระดับการเชื่อมขวาง 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 1000 AGU ร่วมกับการ ออกซิไดซ์ที่เวลา 1-8 ชั่วโมง (7)



รูปที่ 2.13 ความหนืดของแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพดตัดแปรโดยการสร้างพันธะเชื่อมขวาง ที่ระดับการเชื่อมขวาง 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 250 AGU ร่วมกับการออกซิไดซ์ ที่เวลา 1-8 ชั่วโมง (7)



รูปที่ 2.14 ความหนืดของแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพดตัดแปรโดยการสร้างพันธะเชื่อมขวาง ที่ระดับการเชื่อมขวาง 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 175 AGU ร่วมกับการออกซิไดซ์ ที่เวลา 1-8 ชั่วโมง (7)



รูปที่ 2.15 ความหนืดของแป้งเปียกจากแป้งข้าวโพดตัดแปรโดยการสร้างพันธะเชื่อมขวาง ที่ระดับการเชื่อมขวาง 1 พันธะเชื่อมขวาง ต่อ 150 AGU ร่วมกับการออกซิไดซ์ ที่เวลา 1-8 ชั่วโมง (7)