

การดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยวิธีโครอสลิงกิงค์โดยใช้โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต

อิสราภรณ์ เอ็มรัตน์¹ ยური วันดี² สันทณีย์ ปัญจอนันท์³ ดุษฎี อุดภาพ³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ท่าข้าม บางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

จूरรัตน์ พุดตาลเล็ก⁴

มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

และ วิไล รัสชาติทอง⁵

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการดัดแปรแป้งพุทธรักษา (canna starch) พันธุ์ไทยเขียวด้วยวิธีฟอสเฟตโครอสลิงกิงค์โดยใช้โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต (STMP) ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.005%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.2% และ 0.5% (น้ำหนักต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 40°C สภาวะความเป็นกรด-เบส 5.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C นาน 20 ชั่วโมง แป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรที่ได้มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.032% - 0.042% เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรมีรูปร่างและลักษณะเหมือนเดิมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer ที่ความเข้มข้นของแป้ง 6% พบว่าแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรที่ระดับ 0.005% - 0.05% STMP มีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นตามลำดับและมีค่าสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น STMP มากขึ้นเป็น 0.1% - 0.5% พบว่าแป้งมีความหนืดสูงสุดลดลง แป้งที่ดัดแปรมีแนวโน้มที่จะมีค่า setback ลดลง แป้งที่ผ่านการดัดแปรมีความคงตัวต่อสภาพความเป็นกรด-เบสใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่มีความคงตัวต่อสภาพที่มีแรงเฉือนสูงมากกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร แป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรที่ระดับ 0.01% - 0.05% STMP มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร

คำสำคัญ : แป้งพุทธรักษา / การดัดแปรแป้ง / ปฏิกิริยาโครอสลิงกิงค์ / โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต

* Corresponding author : dudsadee.utt@kmutt.ac.th

1 นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

2 นักวิจัย สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

3 รองศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

4 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

5 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

Modification of Canna Starch by Cross-linking with Sodium Trimetaphosphate

Isaraporn Emrat¹, Yuree Wandee², Santhanee Puncha-arnon², Dudsadee Uttapap³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Takham, Bangkhuntien, Bangkok 10150

Chureerat Puttanlek⁴

Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000

and Vilai Rungsardthong⁵

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Wong Sawang, Bangsue, Bangkok 10800

Abstract

Edible canna starch (Thai-green canna) was cross-linked with different concentrations (0.005%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, and 0.5%) of sodium trimetaphosphate (STMP) at 40°C, pH 5.5 for 2 h. Modified starches contained 0.032% – 0.042% of phosphorus content. Scanning electron micrographs showed that the granular size and shape of the modified starch granules were similar to those of the native starch granules. Investigation on pasting properties of 6% w/w starch using Rapid Visco Analyzer (RVA) revealed that peak viscosities of cross-linked starches increased with increasing concentration of STMP from 0.005% to 0.05%, but decreased when concentration of STMP was further increased (from 0.1% to 0.5%). Most of the modified starches exhibited lower setback. Stability of the cross-linked starches to low pH was not improved, whereas that to high shear was superior when compared to the native starch. Starches modified with 0.01% – 0.05% STMP had higher freeze-thaw stability than the native starch.

Keywords : Canna Starch / Modification / Cross-linking / Sodium Trimetaphosphate

* Corresponding author : dudsadee.utt@kmutt.ac.th

¹ Graduate Student, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

² Researcher, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

³ Associate Professor, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

⁴ Assistant Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Engineering and Industrial Technology.

⁵ Associate Professor, Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Applied Science.

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการใช้แป้งเป็นสารให้ความข้นหนืดและเพิ่มความคงตัวให้แก่ผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์อาหารมีความหลากหลายสูงจึงต้องการแป้งที่มีสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน ดังนั้นแป้งที่จะนำมาใช้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละแบบ การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของแป้งอาจทำได้หลายวิธีทั้งวิธีการทางด้านกายภาพ เช่น การให้ความร้อน การใช้แรงทางกลและวิธีการตัดแปรทางเคมี เช่น การย่อยด้วยกรด/เอนไซม์ การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีเทอร์ฟิเคชัน เอสเทอร์ฟิเคชัน และครอสลิงกิง เป็นต้น แป้งครอสลิงค์เป็นแป้งตัดแปรชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารมาก เนื่องจากมีสมบัติที่ดีคือแป้งมีความคงตัวสูงต่ออุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด และแรงเฉือน การแตกของเม็ดแป้งลดลงทำให้แป้งสุกมีค่าความหนืดที่คงที่และไม่เหนียวหนืด [1] นอกจากนี้แป้งครอสลิงค์ยังมีประโยชน์ในแง่ทางโภชนาการ โดยอาจใช้เป็นแหล่งของใยอาหาร (dietary fiber) เนื่องจากพบว่าเอนไซม์ในลำไส้จะย่อยแป้งครอสลิงค์ได้น้อยลง [2]

แป้งครอสลิงค์โดยทั่วไปได้จากการทำปฏิกิริยาของเม็ดแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ (multifunctional reagents) ซึ่งสามารถสร้างพันธะอีเทอร์หรือเอสเทอร์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง [3, 4, 5] พันธะโคเวเลนต์ที่เติมเข้าไปจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างโมเลกุลของแป้งทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น [2] สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแป้งครอสลิงค์เพื่อใช้ในอาหารมีหลายประเภท เช่น monosodium phosphate, sodium tripolyphosphate (STPP), sodium trimetaphosphate (STMP), epichlorohydrin (EPI), phosphorus oxychloride (POCl_3), ของผสมระหว่าง succinic anhydride และ vinyl acetate, ของผสมระหว่าง adipic acid และ acetic anhydride เป็นต้น (CFR, 1995) POCl_3 และ STMP เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาแต่ POCl_3 จะมีความเป็นพิษเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำ [1]

สำหรับในอุตสาหกรรมอาหารมีเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแป้งตัดแปรไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate) โดย

กำหนดว่าสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาครอสลิงกิงคือโซเดียมไตรเมทาฟอสเฟตและฟอสฟอรัสออกไซด์คลอไรด์ ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณฟอสเฟต (คำนวณเป็นฟอสฟอรัส) ไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับแป้งที่ทำจากมันฝรั่งหรือข้าวสาลี และไม่เกินร้อยละ 0.04 สำหรับแป้งที่ทำจากพืชอื่น [6]

แป้งพุทธรักษาเป็นแป้งที่สกัดได้จากส่วนเหง้าของต้นพุทธรักษากินได้ (*canna edulis*) ลักษณะที่เด่นของแป้งพุทธรักษาคือ เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ (40-50 μm) มีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ในปริมาณที่น้อยมาก [7, 8] แต่มีโมโนฟอสเฟตเอสเทอร์ในปริมาณสูง เมื่อเทียบกับแป้งอื่นๆ เมื่อนำแป้งไปเจลาทิไนซ์ด้วยความร้อน แป้งสุกที่ได้จะใสและมีความหนืดสูง [8] จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในอุตสาหกรรมอาหาร แต่เนื่องจากแป้งพุทธรักษาไม่ทนต่อสภาพความเป็นกรดและแรงเฉือนสูงๆ และไม่คงตัวต่อสภาวะการแช่เยือกแข็งและการคินรูปจากเยือกแข็ง [9, 10] ดังนั้นการที่จะนำแป้งพุทธรักษาไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดจึงควรที่จะปรับปรุงคุณภาพของแป้งให้ดีขึ้น ซึ่งจากรายงานการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นบ่งชี้ว่าการตัดแปรแป้งโดยวิธีการครอสลิงกิงน่าจะช่วยลดข้อด้อยต่างๆ ดังกล่าวของแป้งพุทธรักษาได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยการตัดแปรแป้งพุทธรักษาสายพันธุ์ไทยเขียวด้วยวิธีฟอสเฟตครอสลิงกิงโดยใช้ STMP ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นสารเชื่อมข้าม และตรวจสอบสมบัติของแป้งพุทธรักษาตัดแปรที่เตรียมได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้แป้งตัดแปรที่มีค่าความหนืดสูงชั้นเม็ดแป้งมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น สามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดและแรงเฉือน และมีความคงตัวต่อสภาวะการแช่แข็งได้ดี

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงาน

2.1 วัสดุุดิบ

- แป้งพุทธรักษาสายพันธุ์ไทยเขียว

2.2 การเตรียมแป้งฟอสเฟตครอสลิงกิง

(ดัดแปลงจากวิธีของ Woo และ Seib [1])

ทำการตัดแปรแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวด้วยวิธีฟอสเฟตครอสลิงกิงโดยใช้โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต

(sodium trimetaphosphate; STMP) โดยชั่งแป้ง 100 ก. โดยน้ำหนักแป้งแห้งใส่ในขวดแก้วฝาเกลียวขนาด 1000 มล. เติมน้ำละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลเฟต (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.3 ก. และโซเดียมซัลเฟต 15 ก. ในน้ำกลั่น 120 มล.) ลงไปและกวนให้เข้ากันโดยใช้ stirrer เติม STMP ความเข้มข้น 0.005%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.2% และ 0.5% (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) แล้วปรับ pH เป็น 11.0 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 M ปิดฝาเกลียว แล้วนำมาเขย่าใน incubator shaker ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 120 นาที ปรับ pH เป็น 5.5 ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.0 M แล้วนำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น โดยกวนให้เข้ากันและกรองน้ำล้างออก ทำการล้างซ้ำจนกระทั่งน้ำล้างไม่เกิดตะกอนสีขาวเมื่อเติมแบเรียมคลอไรด์ นำแป้งไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40°C ประมาณ 21 ชั่วโมง จนความชื้นลดลงเหลือ 10-12% บดแป้งให้ละเอียดด้วยโกร่งบด แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 140 เมช (mesh)

2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

- ความชื้น โดยวิธี Direct Heating Method (AOAC) [11]
- ปริมาณอะไมโลส โดยวิธีของ Ratnayake และคณะ [12]
- ปริมาณโปรตีน โดยวิธีของ AOAC [13]
- ปริมาณไขมันรวม โดยวิธีของ Olewnik และ Kulp [14]
- ปริมาณฟอสฟอรัส โดยวิธีของ Smith และ Caruso [15]
- ปริมาณเถ้า โดยวิธีของ AOAC [16]

2.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี กายภาพ

- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเม็ดแป้ง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) [17]

- การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง โดยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) [18]
- ลักษณะของเม็ดแป้งหลังให้ความร้อน (เจลแป้งจาก RVA) ด้วยกล้องจุลทรรศน์
- ความคงตัวของแป้งต่อสภาพความเป็นกรดและแรงเฉือน โดยใช้เครื่อง RVA [18]
- ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง (Freeze-thaw stability) ของแป้ง [18]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ระดับการเกิดปฏิกิริยาฟอสเฟตครอสลิงกิงค์

จากการวิเคราะห์ระดับการเกิดครอสลิงกิงค์โดยการวัดปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ผ่านการดัดแปรด้วย STMP ที่ระดับความเข้มข้น 0.005%, 0.01%, 0.05%, 0.10%, 0.20% และ 0.50% พบว่าแป้งดัดแปรที่ได้มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของ STMP ที่เติมลงไปคือ มีฟอสฟอรัส 0.032%, 0.034%, 0.037%, 0.039%, 0.040% และ 0.042% ตามลำดับ (ตารางที่ 1) โดยแป้งเริ่มต้นที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณฟอสฟอรัส 0.032% ซึ่งตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม [6] ได้กำหนดไว้ว่าโดสตาซฟอสเฟตต้องมีปริมาณฟอสเฟตคำนวณในรูปของฟอสฟอรัสไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับแป้งที่ทำจากมันฝรั่งหรือข้าวสาลี และ 0.04 สำหรับแป้งที่ทำจากพืชอื่น ดังนั้นแป้งพุทธรักษาดัดแปรทั้งหมดที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ ยกเว้นแป้งดัดแปรที่ใช้ STMP ที่ความเข้มข้น 0.5% จึงเป็นไปตามข้อกำหนด อย่างไรก็ตามมาตรฐานของแป้งพุทธรักษาดัดแปรน่าจะจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับแป้งมันฝรั่งหรือข้าวสาลี เนื่องจากเป็นแป้งที่มีปริมาณฟอสฟอรัสเดิม (ใน native starch) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อนำมาดัดแปรโดยวิธีครอสลิงกิงค์ซึ่งเป็นการเติมหมู่ฟอสเฟตเข้าไปในโมเลกุลแป้ง จึงทำให้เม็ดแป้งมีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากำหนดของมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปร

ตัวอย่างแป้ง	องค์ประกอบของแป้ง (%ของน้ำหนักแป้งแห้ง)				
	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	ฟอสฟอรัส	อะไมโลส
Native	0.009 ± 0.000	0.0050 ± 0.000	0.15 ± 0.03	0.032 ± 0.001	20.97 ± 0.622
XL 0.005%	0.009 ± 0.001	0.0228 ± 0.003	0.16 ± 0.01	0.032 ± 0.001	20.68 ± 0.205
XL 0.01%	0.010 ± 0.002	0.0311 ± 0.000	0.17 ± 0.00	0.034 ± 0.000	19.06 ± 0.000
XL 0.05%	0.010 ± 0.001	0.0101 ± 0.000	0.17 ± 0.01	0.037 ± 0.000	12.30 ± 1.662
XL 0.1%	0.021 ± 0.004	0.0449 ± 0.005	0.17 ± 0.01	0.039 ± 0.001	16.86 ± 0.205
XL 0.2%	0.027 ± 0.001	0.0782 ± 0.010	0.17 ± 0.01	0.040 ± 0.000	7.00 ± 0.205
XL 0.5%	-	-	0.19 ± 0.00	0.042 ± 0.001	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

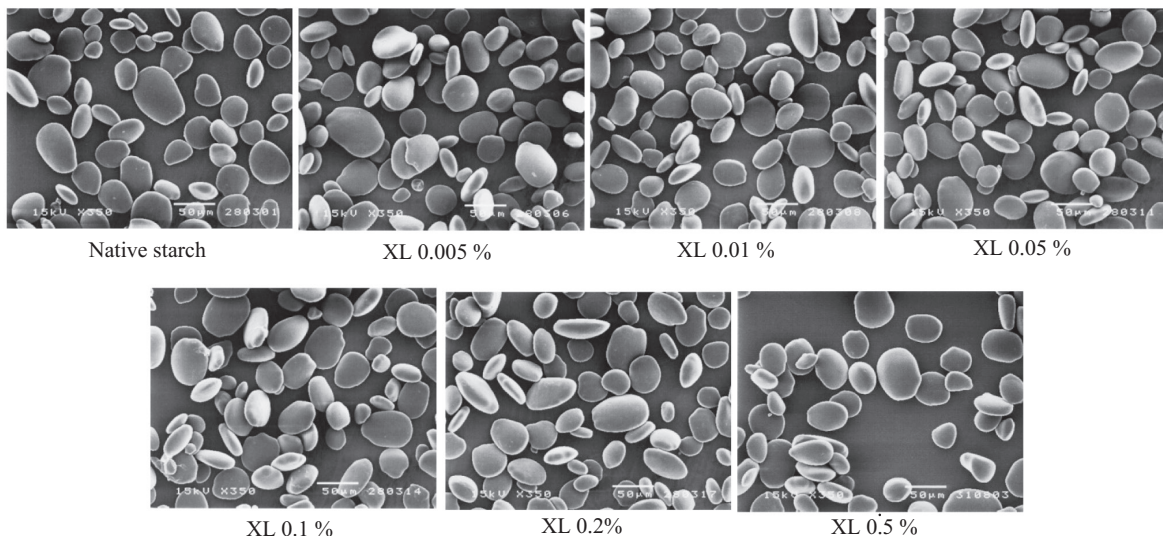
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปร

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าในปริมาณที่ต่ำมากเช่นเดียวกับแป้งจากหัวและราก เช่น แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง แต่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าว แป้งสาธู ที่มีปริมาณปริมาณฟอสฟอรัสต่ำกว่า 0.02% ปริมาณอะไมโลสในแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีค่าเท่ากับ 20.97% ของน้ำหนักแป้งแห้ง ส่วนแป้งที่ตัดแปรด้วย STMP พบว่าปริมาณอะไมโลสที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำลง โดยมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อระดับการโครอสลิงค์เพิ่มมากขึ้นอาจเนื่องมาจากโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ในเม็ดแป้งยึดเกาะกันได้ดีขึ้นด้วยพันธะเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาโครอสลิงค์ทำให้ละลายออกมาได้ไม่สมบูรณ์ การเกิดสารเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีนจึงลดลง โดยพบว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรจะใช้เวลาในการละลายแป้งตัวอย่างในสารละลาย 90% DMSO ประมาณ 3 ชั่วโมง ส่วนแป้งโครอสลิงค์จะ

ใช้เวลาในการละลายเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ STMP ที่เพิ่มมากขึ้น โดยแป้งตัดแปรที่ระดับความเข้มข้นของ STMP ในช่วง 0.005%-0.01%, 0.05%-0.10% และ 0.2% ใช้เวลาในการละลาย 3 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 3 วัน ตามลำดับ

3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเม็ดแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียว

รูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาสายพันธุ์ไทยเขียวทั้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 350 เท่า แสดงดังรูปที่ 1 พบว่าเม็ดแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขนาดของเม็ดแป้งอยู่ในช่วง 15-60 μm มีลักษณะค่อนข้างกลมแบนหรือเป็นรูปไข่ ผิวของเม็ดแป้งมีลักษณะเรียบ ส่วนเม็ดแป้งที่ตัดแปรด้วย STMP ที่ทุกระดับความเข้มข้น พบว่าเม็ดแป้งมีรูปร่างและลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม Kim และ Lee [19] ศึกษาการตัดแปรแป้งมันฝรั่งด้วยวิธีโครอสลิงค์โดยใช้ epichlorohydrin พบว่าปฏิกิริยาโครอสลิงค์ไม่มีผลต่อลักษณะปรากฏและขนาดของเม็ดแป้งเช่นเดียวกัน

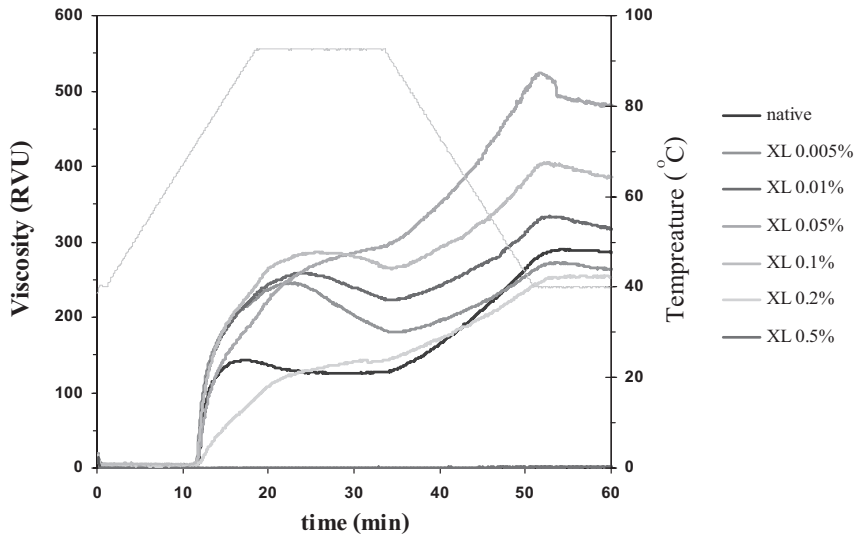


รูปที่ 1 ลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวจาก Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 350 เท่า

3.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียว

เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA ที่ความเข้มข้นแป้ง 6% พบว่าอะไมโลแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 2 แป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีความหนืดสูงสุด 143.4 RVU แป้งมีค่า breakdown ค่อนข้างต่ำ (18.0 RVU) แต่มีค่า setback ที่สูงมาก (160.2 RVU) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเท่ากับ 71.9°C เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ STMP ที่ใช้ในการตัดแปรแป้งจาก 0.005% STMP เป็น 0.01% STMP และ 0.05% STMP แป้งตัดแปรที่ได้มีความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น STMP มากขึ้นเป็น 0.1% STMP, 0.2% STMP และ 0.5% STMP กลับพบว่าแป้งมีความหนืดสูงสุดลดลงตามลำดับ โดยเฉพาะที่ระดับ 0.5% STMP ไม่สามารถตรวจวัดความหนืดของแป้งได้ ซึ่งผลที่ได้นี้สามารถอธิบายได้โดยเมื่อให้ความร้อนกับเม็ดแป้งในสถานะที่มีน้ำ เม็ดแป้งจะเริ่มดูดซึมน้ำไว้ ความร้อนและแรงดันจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งในส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบในเม็ดแป้งก่อนทำให้น้ำสามารถซึมเข้าไปภายในเม็ดแป้งและเกิดการพอง

ตัวได้มากขึ้น เมื่อให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเม็ดแป้งที่ขยายใหญ่ขึ้น โมเลกุลแป้งบางส่วนที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้ง รวมถึงปริมาณน้ำภายนอกที่ลดลงจนเมื่อเม็ดแป้งเกิดการพองตัวเต็มที่จึงแตกออกซึ่งทำให้ความหนืดลดลง [20] การทำปฏิกิริยาครอสลิงค์ด้วยสารเชื่อมข้ามเป็นการเพิ่มพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลแป้งเข้าไปเพิ่มเติมนอกเหนือจากพันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่เดิม แม้จะมีในปริมาณน้อยแต่เป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเม็ดแป้งจึงสามารถพองตัวเพิ่มมากขึ้นได้ก่อนที่จะแตกออกทำให้ความหนืดของแป้งมีค่าสูงขึ้นตามระดับ STMP ที่เติมลงไป อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับการครอสลิงค์มากขึ้น (0.1% - 0.5% STMP) ความหนืดกลับมีค่าลดลงเนื่องจากความถี่ของพันธะโควาเลนต์ที่มากขึ้นทำให้โมเลกุลแป้งภายในเม็ดแป้งถูกยึดกันแน่นขึ้น การพองตัวของแป้งจึงลดลงทำให้แป้งตัดแปรมีความหนืดลดลง และแป้งตัดแปรที่ระดับ 0.5% STMP โมเลกุลแป้งภายในถูกยึดกันอย่างแข็งแรง เม็ดแป้งพองตัวน้อยมากจนกระทั่งไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดได้ แป้งตัดแปรที่ได้มีแนวโน้มของ setback ลดลง (ยกเว้นที่ระดับ 0.05% STMP) ซึ่งบ่งชี้ว่าแป้งครอสลิงค์ที่ได้มีการคืนตัวของแป้งลดลง



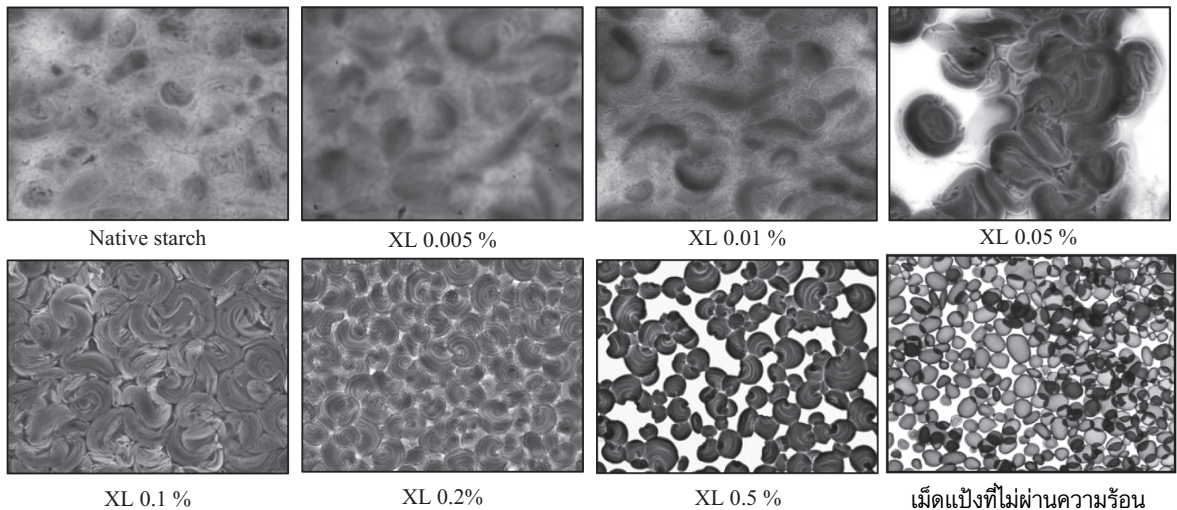
รูปที่ 2 อะไมโลแกรมของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร (native) และแป้งครอสลิงค์ที่ระดับความเข้มข้น STMP 0.005%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.2% และ 0.5%

ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตินเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ ทำให้เจลแป้งมีความหนืดสูงขึ้น การดัดแปรแป้งด้วยการครอสลิงกิงค์ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น แป้งดัดแปรที่ได้จึงเกิดการคืนตัวลดลง [21] สำหรับอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของแป้งดัดแปรพบว่าอยู่ในช่วง 70.8–71.5°C ซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรในแง่ของการนำไปใช้งาน โดยรวมแล้วแป้งครอสลิงค์ที่ได้ (ที่ระดับ $\leq 0.1\%$ STMP) มีความหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้แป้งยังมีแนวโน้มที่จะเกิดการคืนตัวลดลง ซึ่งน่าจะเป็นผลในทางบวกต่อการนำแป้งดัดแปรไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด ส่วนแป้งครอสลิงค์ที่ระดับ 0.5% STMP อาจนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเม็ดแป้งที่มี

ความแข็งแรงสูงไม่เกิดการพองตัวเมื่อให้ความร้อน

3.5 ลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวหลังให้ความร้อน

เมื่อนำเจลของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวทั้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA มาศึกษารูปร่างและลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 3) พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเม็ดแป้งในสถานะที่มีน้ำจนเม็ดแป้งเกิดเจลลิตินเซชัน เม็ดแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะเกิดการพองตัวและแตกออก ส่วนลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความเข้มข้นของ STMP 0.005% และ 0.01% พบว่าเม็ดแป้งเกิดความพองตัวและแตกออกเช่นเดียวกับเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่ยังคงสามารถมองเห็นรูปร่างของเม็ดแป้งอยู่บ้าง ส่วนลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความเข้มข้นของ STMP 0.05% และ 0.1%

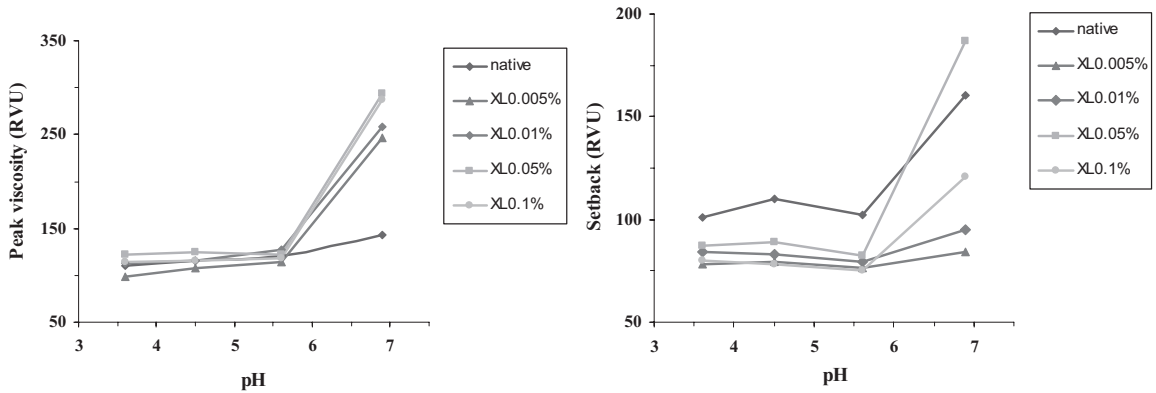


รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า

พบว่าเม็ดแป้งสามารถพองตัวได้มากขึ้นก่อนที่จะแตกออก และสามารถคงสภาพของเม็ดแป้งไว้ได้มากกว่าเม็ดแป้งตัดแปรที่ระดับ 0.005% และ 0.01% ส่วนลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ผ่านการตัดแปรที่ระดับความเข้มข้นของ STMP 0.2% และ 0.5% พบว่าเม็ดแป้งยังคงสภาพที่เป็นเม็ดและมีการพองตัวลดลงตามลำดับ โดยแป้งตัดแปรที่ระดับความเข้มข้นของ STMP 0.5% เม็ดแป้งมีการพองตัวสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนเล็กน้อย ซึ่งลักษณะของเม็ดแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนนี้สอดคล้องกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งที่ศึกษาโดยเครื่อง RVA กล่าวคือ เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของ STMP ที่ใช้ในการตัดแปรแป้งมากขึ้น โครงสร้างภายในเม็ดแป้งจะมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาครอสลิงค์เป็นการเพิ่มพันธะโควาเลนต์เข้าไประหว่างโมเลกุลแป้งนอกเหนือจากพันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่เดิม ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งในสภาวะที่มีน้ำ เม็ดแป้งจึงสามารถพองตัวเพิ่มมากขึ้นได้ก่อนที่จะแตกออก ความหนืดของแป้งจึงสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับการครอสลิงค์จนถึงค่าๆ หนึ่ง จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดแป้งสูงมากขึ้นจนทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้น้อยลง ดังนั้นความหนืดของแป้งจึงลดลงตามลำดับ

3.6 ความคงตัวของแป้งตัดแปรต่อสภาพความเป็นกรด

เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้ STMP ที่ความเข้มข้น 0.005%, 0.01%, 0.05% และ 0.1% และไม่ผ่านการตัดแปรมาศึกษาความคงตัวต่อสภาพความเป็นกรดที่ระดับ pH 3.6, 4.5, 5.6 และ 6.9 โดยใช้แอซิติเทบ์ฟเฟอร์ที่ความเร็วรอบ 160 rpm ด้วยเครื่อง RVA และนำค่าความหนืดสูงสุดและค่า setback ที่อ่านได้จากอะไมโลแกรมมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับค่า pH ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าที่ pH 6.9 แป้งครอสลิงค์จะมีค่าความหนืดสูงกว่าแป้งที่ไม่ตัดแปรประมาณเท่าตัวหรือมากกว่า แต่เมื่อลดค่า pH ลงจาก 6.9 เป็น 5.6 ความหนืดสูงสุดของแป้งพุทธรักษาทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและมีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อลดค่า pH ลงไปอีกเป็น 4.5 และ 3.6 พบว่าความหนืดสูงสุดของแป้งพุทธรักษาทั้งหมดลดลงเพียงเล็กน้อยโดยอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน สำหรับค่า setback ของแป้ง พบว่าตลอดช่วง pH ที่ทดสอบแป้งครอสลิงค์ทั้งหมด (ยกเว้นที่ระดับ 0.05% STMP ที่ pH 6.9) มีค่า setback ที่ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ตัดแปร เมื่อลด pH ลงจาก 6.9 เป็น 5.6 ค่า setback ของแป้งครอสลิงค์

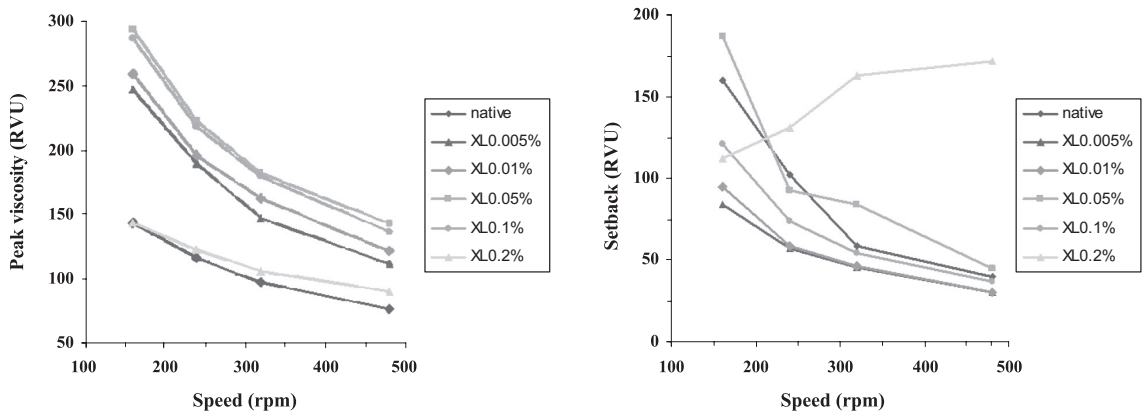


รูปที่ 4 ผลของ pH ต่อความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และ setback ของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปร

ทั้งหมดจะลดลงอย่างชัดเจนและมีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะแป้งครอสลิงค์ที่ระดับ 0.05% STMP ค่า setback ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อลดค่า pH ลงไปอีกจนถึง 3.6 จะพบว่าแป้งครอสลิงค์ทั้งหมดมีค่า setback ที่ใกล้เคียงกัน การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดลดลงเมื่อ pH เป็นกรดมากขึ้น เนื่องจากในสภาพกรดพันธะกลูโคซิดิกในโมเลกุลจะถูกไฮโดรไลซ์ทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลงและแตกได้ง่ายขึ้น ดังนั้นความหนืดของแป้งจึงลดลงที่ pH ต่ำๆ ผลการทดลองที่ได้แตกต่างไปจากที่คาดไว้ว่าแป้งครอสลิงค์น่าจะทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ดีขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพันธะเชื่อมข้ามที่เพิ่มเข้าไปมีปริมาณน้อยจึงอาจถูกไฮโดรไลซ์ได้ในสภาพที่เป็นกรดเช่นกันซึ่งจากผลที่ได้ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแป้งตัดแปรที่เตรียมได้ไม่สามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดที่ pH ต่ำๆ ได้

3.7 ความคงตัวของแป้งตัดแปรต่อแรงเฉือนหรือการกวน

เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรมาศึกษาความคงตัวต่อแรงกวนด้วยเครื่อง RVA ที่ความเร็วรอบในกวน 160, 240, 320 และ 480 rpm ที่ pH 6.9 ผลของความเร็วรอบในการกวนต่อค่าความหนืดสูงสุดและค่า setback ของแป้งแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนทั้งแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรมีความหนืดสูงสุดลดลงโดยแป้งครอสลิงค์ที่ระดับ 0.005%-0.1% STMP มีแนวโน้มในการลดลงที่ใกล้เคียงกัน และที่ระดับ 0.2% STMP แนวโน้มของการลดลงจะค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร อย่างไรก็ตามที่ทุกค่าของความเร็วรอบ ความหนืดสูงสุดของแป้งครอสลิงค์ทั้งหมดมีค่าสูงกว่าแป้งที่ไม่ตัดแปร



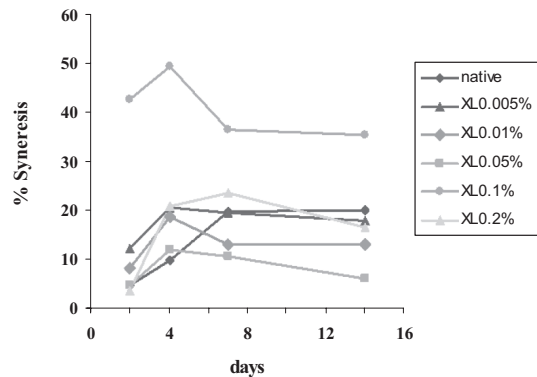
รูปที่ 5 ผลของความเร็วรอบในการกวนต่อความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และ setback ของแป้งพุทธรักษา

ซึ่งแสดงว่าแป้งครอสลิงค์ทนต่อแรงกระทำจากการกวนได้ดีกว่าแป้งที่ไม่ดัดแปร การที่แป้งมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วยกวนในการกวนเนื่องจากแรงเฉือนจากการกวนที่สูงขึ้นทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวเกิดการแตกและโมเลกุลแป้งกระจายตัวได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดของเจลแป้งลดลง สำหรับค่า setback พบว่าแป้งพุทธรักษาที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรมีค่า setback ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วยกวนในการกวน ยกเว้นแป้งครอสลิงค์ที่ 0.2% STMP ซึ่งมีค่า setback เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วยกวนในการกวนมากขึ้น การที่แป้งมีค่า setback ลดลงเมื่อความเร็วยกวนในการกวนสูงขึ้นเนื่องมาจากแรงจากการกวนทำให้โมเลกุลของอะไมโลสกระจุกกระจายมากขึ้น และโมเลกุลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ดังนั้นโอกาสที่อะไมโลสจะมาจับตัวกันใหม่จึงเกิดได้ยากขึ้น จึงทำให้แป้งมีค่า setback ลดลงส่วนแป้งครอสลิงค์ที่ระดับ 0.2% STMP ให้ผลที่แตกต่างออกไปโดยการเพิ่มความเร็วยกวนในการกวนทำให้แป้งมีค่า setback สูงขึ้น อธิบายได้ว่าแป้งครอสลิงค์ที่ระดับ 0.2% STMP เป็นแป้งที่มีความแข็งแรงสูง ในขณะที่ให้ความร้อนเม็ดแป้งจะพองตัวแต่ยังอยู่ในสภาพที่ยังสมบูรณ์ (รูปที่ 3) การเพิ่มแรงกระทำจากการกวนจะทำให้โมเลกุลแป้งหลุดออกมาจากเม็ดแป้งมากขึ้น ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงจึงกลับมาสสร้าง network ได้ดีขึ้น

3.8 ความคงตัวของแป้งต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง

เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรมาทำการศึกษาความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง ซึ่งแสดงในรูปของปริมาณของเหลวที่แยกออกจากเจลแป้งสุกที่ผ่านการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งเป็นเวลา 2, 4, 7 และ 14 วัน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นว่าแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรเจลแป้งเกิด syneresis สูงในช่วง 7 วันแรก หลังจากนั้นจะเริ่มมีค่าคงที่ ส่วนแป้งครอสลิงค์ที่ทุกระดับความเข้มข้นพบว่าเจลแป้งเกิด syneresis อย่างรวดเร็วในช่วง 4 วันแรกของการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง หลังจากนั้นการเกิด syneresis เริ่มคงที่หรือมีค่าลดลงในช่วงหลังวันที่ 7 แป้งครอสลิงค์ (ยกเว้นที่ระดับ 0.1% STMP) เกิด syneresis

ในระดับที่ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าแป้งที่ไม่ดัดแปรโดยแป้งครอสลิงค์ที่ระดับ 0.05% มีระดับการเกิด syneresis ต่ำที่สุด



รูปที่ 6 ผลการแช่เยือกแข็งและละลายของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปร

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อลดระดับการครอสลิงค์ จากระดับ 0.05%, 0.01% และ 0.005% STMP แป้งดัดแปรมีแนวโน้มว่าจะเกิด syneresis เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับ 0.005% STMP มีค่าใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ดัดแปร ส่วนแป้งที่มีระดับการครอสลิงค์สูง (0.1% และ 0.2% STMP) แป้งมีแนวโน้มการเกิด syneresis ที่สูงขึ้น ซึ่งคาดว่าสภาพของเม็ดแป้งในเจล (การพองตัวมากน้อย/ระดับการแตกของเม็ดแป้ง) ก่อนนำมาเก็บรักษาน่าจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิด syneresis ของแป้ง จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรด้วยวิธีครอสลิงค์โดยใช้ STMP อาจมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ขึ้นอยู่กับระดับการเกิดครอสลิงค์ ซึ่งจากงานวิจัยของ Yeh และ Yeh [22] ที่ได้ศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวดัดแปรด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันและวิธีครอสลิงค์โดยใช้ POCl_3 พบว่าแป้งข้าวที่ดัดแปรด้วยวิธีครอสลิงค์ไม่คงตัวต่อสภาวะการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง แต่เมื่อดัดแปรแป้งข้าวด้วยวิธีครอสลิงค์ร่วมกับวิธีไฮดรอกซีโพรพิเลชันโดยทำการครอสลิงค์แป้งข้าวก่อนแล้วตามด้วยการทำไฮดรอกซีโพรพิเลชันพบว่า

สามารถเพิ่มความคงตัวของแป้งดัดแปรต่อสภาวะการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งได้มากขึ้น นอกจากนี้ Yeh และ Yeh [22] ยังได้รายงานถึงความคงตัวของแป้งต่อการแช่แข็งและละลายนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งที่ใช้ด้วย แต่จากรายงานของศุภวรรณ อนุเวชศิริเกยติ และคณะ [23] ที่ได้ศึกษาการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วย STMP พบว่าแป้งดัดแปรมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งได้ถึง 4 รอบโดยไม่เกิดการ syneresis และเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งไปถึง 10 รอบ การเกิด syneresis ของเจลแป้งก็ยังคงมีค่าต่ำ

4. สรุปผล

จากการศึกษาการดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยวิธีโครสลิงกิงค์โดยใช้ STMP พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ STMP ที่ใช้ในการดัดแปรให้สูงขึ้น แป้งดัดแปรที่ได้มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น รูปร่างและลักษณะของเม็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แป้งดัดแปรที่ระดับ 0.005% - 0.1% STMP มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนแป้งดัดแปรที่ระดับ 0.2% และ 0.5% มีความหนืดลดลง แป้งที่ผ่านการดัดแปรมีความคงตัวต่อสภาพความเป็นกรดใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่มีความคงตัวต่อสภาวะที่มีแรงเฉือนสูงมากกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร แป้งพุทธรักษาดัดแปรที่ระดับ 0.01% - 0.05% STMP มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็งสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

1. Woo, K.S. and Seib, P.A., 1997, "Cross-linking of wheat starch and hydroxypropylated wheat starch in alkaline slurry with sodium trimetaphosphate", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 33, pp. 263-270.
2. Jaspreet, S., Lovedeep, K., and OJ, Mc.,

2007, "Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications – A review", *Food Hydrocolloids*, Vol. 21, pp. 1-22.

3. Rutenberg, M.W. and Solarek, D., 1984, "Starch derivatives: production and uses", *Starch Chemistry and Technology*, 2nd Ed., Whistler, R.L., BeMiller, J.N., Paschall E.F. (Eds.): Orlando, FL: Academic Prees, pp. 311-499.

4. Wurzburg OB., 1986a, "Nutritional aspects and safety of modified food starches", *In Nutrition Reviews*, Wurzburg, OB. (Ed.), Vol. 44, pp. 74-80.

5. Wurzburg OB., 1986b, "Cross-linked starches", *In Modified Starches: Properties and Uses*, Wurzburg, OB. (Ed.), CEC Press, Florida, pp. 41-53.

6. Ministry of Industry, 1992, "Standards for modified starch for food industry", *Document No. 1073-2535*, Thai Industrial Standards Institute, Bangkok, pp. 1-11. (in Thai)

7. Chansuwan, W., 2001, *Characterization of starch isolated from edible canna rhizome*, Master Thesis, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)

8. Leovasut, S., 2004, *Effect of gelatinization temperature and time on properties of edible canna*, Master Thesis, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)

9. Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., and Uttapap, D., 2005, "Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 61, pp. 211-221.

10. Chuenkamol, B., Puttanlek, C., Rungsardthong,

V., and Uttapap, D., 2007, "Characterization of low-substituted hydroxypropylated canna starch", *Food Hydrocolloids*, Vol. 21, pp. 1123-1132.

11. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 1995, *Official method of analysis, 15th ed.*, Virginia: The Association of Official Agricultural Chemists.

12. Ratnayake, W.S., Hoover, R., Shahidi, F., Perera, C., and Jane, J., 2001, "Composition, molecular structure, and physicochemical properties of starches from four field pea (*Pisum sativum* L.) cultivars", *Food Chemistry*, Vol. 74, pp. 189-202.

13. AOAC, 2000, *Approved methods of the AOAC, 17th ed., Method 991.43, Total dietary fiber enzymatic gravimetric method. First action, 1992*, The Association: Gaithersburg, MD.

14. Olewnik, M. and Kulp, K., 1990, "Factors affecting performance characteristics of wheat flour in batters", *In: Batters and breadings in food processing*, K. Kulp and R. Loewe, Eds. Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, MN., pp. 93-116.

15. Smith, R.J. and Caruso, J., 1964, "Determination of Phosphorus", *In Starch: Methods in carbohydrate chemistry*, Whistler, R.L. (Ed.), Orlando, FL Academic press, Vol. 4, pp. 42-46.

16. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 1984, *Official methods of analysis, 4th ed.*, Virginia: The Association of Official Agricultural

Chemists.

17. Sahai, D. and Jackson, D.S., 1996, "Structural and chemical properties of native corn starch granules", *Starch*, Vol. 48, pp. 249-255.

18. Thitipraphunkul, K., Uttapap, D., Piyachomkwan, K., and Takeda, Y., 2003, "A comparative study of edible canna (*Canna edulis*) starch from cultivars, Part I: Chemical composition and physicochemical properties", *Carbohydrate Polymer*, Vol. 53, No. 3, pp. 317-324.

19. Kim, M. and Lee, S.J., 2002, "Characteristics of cross-linked potato starch and starch-filled linear low-density polyethylene films", *Carbohydrate Polymer*, Vol. 50, pp. 331-337.

20. Sanders, J.P.M., 1996, "Starch manufacturing in the world", *Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology*, January 22 -26 & February 19 - 23, AIT Center, Bangkok.

21. Sriroth, K. and Piyachomkwan, K., 2003, *Starch technology, third edition*, Kasetsart University Press, Bangkok, 292 p. (in Thai)

22. Yeh, A. and Yeh, S., 1993, "Some characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rice starch", *Cereal Chemistry*, Vol. 70, pp. 596-601.

23. Anuvejsirikiat, S., Kaewmoung, A., and Hongsprabhas, P., 1993, "Modification of tapioca starch using sodium tripolyphosphate", *Srinakharinwirot Science Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 41-47. (in Thai)