

## ผลของการตัดแปรแป้งด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติและโครงสร้างของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B

ณัชชชี่ ณัชชภาสัสมณ<sup>1</sup> สันทณีย์ ปัญจอนันท์<sup>2</sup> และ ดุษฎี อุตภาพ<sup>3</sup>  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการตัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนขึ้น (heat-moisture treatment; HMT) ต่อสมบัติของแป้ง (starch) ที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน โดยแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ส่วนแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ได้แก่ แป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือ ทำการตัดแปรโดยควบคุมความชื้นของแป้งที่ร้อยละ 25 และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าการตัดแปรไม่ส่งผลต่อลักษณะปรากฏของเม็ดแป้ง แป้งทุกชนิดมีความหนืดลดลงและอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้น แต่แป้งแบบ B มีระดับการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าแป้งแบบ A อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันมีระดับการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แป้งข้าวเจ้ามีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง และแป้งพุทธรักษามีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมากกว่าแป้งมันมือเสือ เมื่อวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometry พบว่าแป้งแบบ B มีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากแบบ B เป็นแบบ C (A+B) ในขณะที่โครงสร้างผลึกของแป้งแบบ A ไม่เปลี่ยนแปลง จากการวิเคราะห์การกระจายตัวสายโซ่โพลีเพคตินด้วย high pressure size exclusion chromatography พบว่าความยาวเฉลี่ยของสายโซ่และการกระจายตัวสายโซ่ที่มีขนาดต่างๆ ของแป้งทั้ง 4 ชนิด ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย HMT ไม่แตกต่างกัน จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสมบัติของแป้งที่ตัดแปรโดยวิธี HMT

**คำสำคัญ :** แป้งข้าว / แป้งมันสำปะหลัง / แป้งพุทธรักษา / แป้งมันมือเสือ / การตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

\* Corresponding Author : dudsadee.utt@kmutt.ac.th

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

<sup>2</sup> นักวิจัย สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

## Effect of Heat-moisture Treatment on Properties and Structure of A- and B-crystalline Type Starches

Chatsachee Chatpapamon<sup>1</sup>, Santhanee Puncha-arnon<sup>2</sup> and Dudsadee Uttapap<sup>3\*</sup>

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

### Abstract

This study aimed to assess whether there are any differences between the impact of heat-moisture treatment (HMT) on physicochemical properties and structure of A- and B-crystalline type starches. Two kinds of A-type (rice and cassava) and B-type (canna and lesser yam) starches with a moisture content of 25% were subject to HMT at 100 °C for 16 h. Granule morphologies of both A- and B-type starches remained unchanged after HMT. All HMT starches had lower paste viscosity and higher pasting temperature compared to the native starch counterparts. The magnitude of change was more pronounced in B-type starches. Among the same crystalline type starches, some differences in the magnitude of change could be observed, i.e., rice starch displayed a larger change than cassava starch and canna starch displayed a larger change than lesser yam starch. X-ray diffraction pattern of the A-type starches was unaffected by HMT, whereas B-type starches was altered to C-type (B+A). Distribution profiles of debranched amylopectin as analyzed by high pressure size exclusion chromatography showed that the average chain length and unit chain distribution of the HMT starches were not significantly different from those of the native starches. The results obtained from this study lead to the conclusion that crystalline structure is a factor that significantly impacts the properties of HMT starches.

**Keywords :** Rice / Cassava / Canna / Lesser Yam / Heat-moisture Treatment

---

\* Corresponding Author : [dudsadee.utt@kmutt.ac.th](mailto:dudsadee.utt@kmutt.ac.th)

<sup>1</sup> Graduate Student, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

<sup>2</sup> Researcher, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

<sup>3</sup> Associate Professor, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

## 1. บทนำ

การตัดแปรแป้งสามารถทำได้หลายรูปแบบทั้งการตัดแปรทางเคมี ภายภาพและเทคโนโลยีชีวภาพ การตัดแปรโดยวิธีการทางกายภาพ เช่น การใช้ความร้อน ความดัน การใช้แรงกล มีข้อดีคือ ไม่ใช้สารเคมีในการตัดแปร จึงจัดเป็น “green technology” กล่าวคือ ไม่ส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม การตัดแปรแป้งโดยวิธีการใช้ความร้อนชื้น (heat-moisture treatment; HMT) เป็นวิธีการทางกายภาพแบบหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่ม hydrothermal treatment การตัดแปรด้วยวิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิในการตัดแปรให้สูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว (glass transition temperature) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชัน (gelatinization temperature) ในสภาวะที่แป้งมีความชื้นจำกัด (ต่ำกว่า 35%) ตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1-24 ชั่วโมง [1,2,3,4,5] จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีรายงานว่า การตัดแปรด้วยวิธี HMT ส่งผลให้แป้งมีการพองตัว ความหนืด ความสามารถในการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ และสมบัติการคืนตัว (retrogradation) เปลี่ยนแปลงไป [1,2,3,4,5, 6,7,8,9,10,11,12,13] โดยระดับการเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้านต่างๆ จะขึ้นกับชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งที่ได้จากการตัดแปรด้วย HMT มีความทนทานต่อความร้อนและแรงกระทำจากการกวนสูง ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับแป้งที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีโครสลิงก์ด้วยสารเคมี [13] ดังนั้นในการนำแป้งไปประยุกต์ใช้มักจะพิจารณาใช้เพื่อเป็นทางเลือกในการทดแทนแป้งตัดแปรชนิดโครสลิงก์ ตัวอย่างการนำแป้งตัดแปรด้วย HMT ไปประยุกต์ใช้ เช่น ใช้ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยว [6,14] Abraham [15] รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายสูงขึ้นและสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมของไส้พาย (pie filling) โดยให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี การใช้แป้ง HMT ในแป้งซุบทอดจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากขึ้น [16] นอกจากนี้แป้งมันฝรั่งตัดแปรยังสามารถใช้ทดแทนแป้งข้าวโพดในขนมขาคแลนได้ [17]

ในธรรมชาติแป้งจะสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ราก หัว เมล็ด ลำต้น ผล ในรูปของเม็ดแป้ง (granule) โดยเม็ดแป้งจากพืชชนิดต่างๆ มีรูปร่างลักษณะ ขนาดและ

องค์ประกอบภายในที่แตกต่างกันไป เม็ดแป้งโดยทั่วไปมีอะไมโลเพคตินเป็นองค์ประกอบหลัก (60-90%) รองลงมาคือ อะไมโลส (10-40%) นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน (< 1%) ไขมัน (< 1%) และเกลือแร่ชนิดต่างๆ ในปริมาณเล็กน้อย จากการศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้งโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer ทำให้ทราบว่าเม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) โดยมีระดับความเป็นผลึกในช่วง 20-40% [18] ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่เกลียวคู่ (double helices) ที่เป็นสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพคติน โดยลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่เกลียวคู่ทำให้สามารถจำแนกแป้งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ซึ่งในหนึ่งยูนิตเซลล์ (unit cell) ประกอบด้วยกลูโคส 12 หน่วย มีลักษณะผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic symmetry) โดย  $a = 2.124$  nm,  $b = 1.172$  nm, and  $c = 1.05$  nm และมีโมเลกุลน้ำภายในจำนวน 4 โมเลกุล แป้งในกลุ่มนี้เป็นแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด กลุ่มที่ 2 มีโครงสร้างผลึกแบบ B ซึ่งในหนึ่งยูนิตเซลล์ (unit cell) ประกอบด้วยกลูโคส 12 หน่วย เช่นกัน มีลักษณะผลึกแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) โดย  $a = b = 1.85$  nm,  $c = 1.04$  nm และมีโมเลกุลน้ำภายในจำนวน 36 โมเลกุล [18] แป้งในกลุ่มนี้เป็นแป้งจากหัวและราก เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งพุทธรักษา ส่วนแป้งที่มีผลึกทั้งสองลักษณะร่วมกันเรียกว่าแป้งแบบ C ส่วนใหญ่เป็นแป้งจากพืชตระกูลถั่ว ถ้ามีผลึกแบบ A เป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่าเป็นแป้งแบบ C<sub>A</sub> เช่น แป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากแป้งทั้งสองกลุ่มมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นการตัดแปรแป้งด้วย HMT จึงอาจส่งผลต่อแป้งทั้งสองกลุ่มในระดับที่ต่างกันด้วย

จากรายงานการศึกษาการตัดแปรแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งแยม (new cocoyam และ true yam) ด้วย HMT พบว่าแป้งตัดแปรมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันและการคืนตัวสูงขึ้น ส่วนการพองตัวและการละลายมีคาลดลง [3,12] ความเป็นผลึกในเม็ดแป้ง (crystallinity) ลดลง [8] การตัดแปรโดยความร้อนชื้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งโดยเฉพาะแป้งที่มีผลึกประเภท B เช่น แป้งมันฝรั่ง โดยพบว่าผลึกจะเปลี่ยนจากชนิด B

เป็นชนิด A+B [4,8] อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับผลของการตัดแปรด้วย HMT ต่อแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงได้เลือกตัวแทนแป้งจากทั้งสองกลุ่มอย่างละ 2 ชนิด คือ แป้งข้าว (rice starch) (แบบ A) แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) (แบบ A หรือ C<sub>A</sub>) แป้งมันมือเสือ (lasser yam starch) (แบบ B) และแป้งพุทธรักษา (canna starch) (แบบ B) โดยทำการตัดแปรแป้งทั้งหมดในสภาวะเดียวกัน (ความชื้นแป้งร้อยละ 25 ให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง) นำแป้งที่ได้มาตรวจสอบลักษณะและวิเคราะห์สมบัติความหนืด โครงสร้างผลึก สมบัติทางความร้อนและโครงสร้างของอะไมโลเพคติน และวิจารณ์ผลของ HMT ต่อสมบัติด้านต่างๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B

## 2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

### 2.1 วัตถุดิบ

แป้งที่ใช้ในการทดลองนี้มี 4 ชนิด โดยทำการสกัดเองจากพืช 3 ชนิด ได้แก่ ข้าวเจ้า มันมือเสือ และพุทธรักษา และได้จากทางการค้า 1 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งแป้งทั้ง 4 ชนิดนี้ได้ผ่านกระบวนการสกัดสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกไปแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสตาร์ช (starch) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า “แป้ง”

แป้งข้าวเจ้าสกัดจากเมล็ดข้าวสายพันธุ์พลายงามปราจีนบุรี (ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าวปราจีนบุรี) โดยนำเมล็ดข้าวสารแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดเมล็ดข้าวด้วยเครื่องปั่นแล้วร่อนผ่านตะแกรง 63 ไมโครเมตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำส่วนที่เป็นแป้งเค้กมาละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.4% ตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง รินส่วนน้ำใสออกแล้วนำแป้งที่เหลือร่อนผ่านตะแกรง 63 ไมโครเมตร และทิ้งไว้ที่ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขั้นตอนของการล้างด้วยน้ำทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นละลายแป้งเค้กในน้ำที่ปรับสภาวะให้เป็นกลาง (pH 7) ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ตั้งทิ้งไว้ที่ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในขั้นตอนสุดท้าย

กำจัดน้ำส่วนใสออกและนำแป้งอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่องบดและร่อนผ่านตะแกรง 106 ไมโครเมตร โดยแป้งข้าวเจ้าที่ได้มีปริมาณโปรตีน 0.38% ไขมัน 0.01% และอะไมโลส 25.01% [19]

แป้งมันมือเสือสกัดจากหัวมันมือเสือโดยนำหัวมาล้าง ปอกเปลือก หั่นเป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาดประมาณ 1 ซม<sup>3</sup> นำมาบดในเครื่องปั่นและกรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกากออก นำของเหลวที่ได้กรองผ่านตะแกรงขนาด 63 ไมโครเมตร ล้างแป้งเค้กด้วยน้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง นำแป้งมาอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แป้งมันมือเสือมีปริมาณโปรตีน 0.14% ไขมัน 0.03% และอะไมโลส 18.89% [20] แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งทางการค้า (E.T.C. International Co., Ltd, กรุงเทพ, ประเทศไทย) มีปริมาณโปรตีน 0.20% ไขมัน 0.30% และอะไมโลส 18.30% [21] และแป้งพุทธรักษาเตรียมตามวิธีของ Pancha-arnon และคณะ [22] โดยนำเหง้ามาล้าง ปอกเปลือก หั่นเป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาดประมาณ 1 ซม<sup>3</sup> นำมาบดในเครื่องปั่นและกรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกากออก นำของเหลวที่ได้กรองผ่านตะแกรงขนาด 106 ไมโครเมตร ล้างแป้งเค้กด้วยน้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง นำแป้งมาอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง แป้งพุทธรักษาที่ได้ประกอบด้วยโปรตีน 0.06 % ไขมัน 0.01% และอะไมโลส 23.90% [22]

### 2.2 การตัดแปรแป้งด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้น

ปรับความชื้นในตัวอย่างแป้งให้เป็นร้อยละ 25 โดยแช่แป้ง 200 กรัม ในน้ำ 600 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใช้เครื่องดูดสูญญากาศดูดน้ำออกให้เหลือแต่แป้งเค้กและปรับระดับความชื้นโดยการผึ่งแป้งในถาดให้น้ำในแป้งเค็กระเหยออกไป วิเคราะห์ความชื้นในแป้งเป็นระยะด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น (Sartorius Moisture Analyzer Model MA35 ประเทศเยอรมัน) จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 25 บรรจุแป้งในขวดและให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง จากนั้นนำแป้งมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 2.3 รูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งตรวจสอบโดยวิธี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscopy)

นำแป้งตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยมาโรยบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่ง aluminium stub นำแท่ง aluminium stub ที่ติดแป้งตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทองที่ผิวของแป้งตัวอย่าง ส่องดูตัวอย่างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-6400, Tokyo, ประเทศญี่ปุ่น) โดยควบคุมสภาวะในการทดลอง ดังนี้ ค่าอัตราเร่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 หรือ 15 kV และใช้กำลังขยายที่ 3500 เท่า สำหรับแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันมือเสือ หรือกำลังขยาย 500 เท่าสำหรับแป้งพุทราและแป้งมันสำปะหลัง

### 2.4 โครงสร้างผลึกทดสอบโดยวิธี X-ray diffraction

โครงสร้างผลึกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (D8 Discover, Bruker Co.) กำหนดสภาวะการทดสอบดังนี้ ตัวกำเนิด X-ray ที่ 40 kV และ 40 mA และมุมสแกน  $2\theta$  จาก  $4^\circ - 45^\circ$  ในอัตราสแกน  $0.1^\circ/\text{นาที่}$

### 2.5 สมบัติด้านความหนืด (pasting properties)

เตรียมแป้งที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (RVA-3D, Newport Scientific, Narrabeen, ประเทศออสเตรเลีย) กวนแป้งโดยใช้ใบพัดแบบ paddle ที่ความเร็วรอบ 160 rpm ให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 40 จนถึง  $92.5^\circ\text{C}$  ด้วยอัตรา  $3^\circ\text{C}/\text{min}$  รักษาระดับอุณหภูมิที่  $92.5^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที และลดระดับอุณหภูมิลงเป็น  $40^\circ\text{C}$  ด้วยอัตรา  $3^\circ\text{C}/\text{min}$

### 2.6 ลักษณะของเจลแป้ง

นำเจลแป้งที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์เครื่อง RVA มาปาดบางๆ ลงบนกระจกสไลด์ แล้วหยดสารละลายไอโอดีนเพื่อให้เห็นเม็ดแป้งได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นปิดด้วย cover glass แล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยใช้กำลังขยาย 200 เท่า

### 2.7 สมบัติทางความร้อนศึกษาโดยวิธี differential scanning calorimetry

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแป้งโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 1, Mettler Toledo, Schwerzenbach, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) เตรียมตัวอย่างโดยชั่งแป้ง 3 มิลลิกรัม ในภาดอลูมิเนียม (ME-00026763, Mettler Toledo, Schwerzenbach สวิตเซอร์แลนด์) และเติมน้ำ 6 มิลลิกรัม ปิดผนึกภาดอลูมิเนียม ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$  ก่อนนำมาวิเคราะห์ ช่วงในการสแกนอุณหภูมิ  $25-100^\circ\text{C}$  และอัตราการให้ความร้อน  $5^\circ\text{C}/\text{นาที่}$  ใช้ภาดอลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง

### 2.8 การแยกอะไมโลเพกตินจากแป้ง (starch fractionation)

กำจัดไขมันที่อยู่ในแป้งโดยละลายแป้งในสารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide; DMSO) 90% และตกตะกอนด้วยเอทานอล 95% [23] จากนั้นทำการแยกส่วนของอะไมโลเพกตินตามวิธีของ Takeda และคณะ [23]

### 2.9 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน (molecular structure of amylopectin)

ชั่งอะไมโลเพกติน 28 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ละลายในน้ำกลั่น 2.8 มิลลิลิตร ให้ความร้อนใน water bath กระทั่งตัวอย่างจะละลายอย่างสมบูรณ์ เตรียมน้ำกลั่น 3.85 มิลลิลิตร และสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ (pH 3.5) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมล ปริมาตร 0.35 มิลลิลิตร ผสมกันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $45^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที เติม isoamylase (Hayashibara Biochemical Laboratories, ประเทศญี่ปุ่น; ความเข้มข้นที่ใช้  $0.03\text{ U}/\text{มิลลิกรัม}$  ของอะไมโลเพกติน) ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาการตัดกิ่งที่อุณหภูมิ  $45^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นหยุดการทำงานของเอนไซม์ด้วยความร้อนโดยแช่ใน water bath ที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 5 นาที ทำให้แห้งโดยใช้เครื่องระเหยแบบสูญญากาศ แล้วเก็บไว้ในขวดแก้วที่ปิดสนิท

การกระจายตัวของกิ่งก้านอะไมโลเพคติน (unit chain distribution) วิเคราะห์ด้วย high performance size exclusion chromatography (HPSEC) โดยใช้คอลัมน์ Zorbax PSM 60S (Agilent Technologies, Santa Clara, CA) ภายในบรรจุ porous silica microspheres ขนาด 5 ไมครอน ความยาวคอลัมน์ 30 เซนติเมตร สองชุดเชื่อมต่อกัน ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 50°C, mobile phase คือ DMSO ละลายในน้ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 90 โดยปริมาตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตร/นาที ละลายอะไมโลเพคตินที่ตัดกิ่งแล้ว 4 มิลลิกรัม ในสารละลาย DMSO ที่ความเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และให้ความร้อนเป็นเวลา 5 นาที ใน water bath เติมน้ำละลาย DMSO ที่ความเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน ฉีดสารละลาย 40 ไมโครลิตร เข้าไปในระบบ HPSEC โดย calibration curve เตรียมโดยใช้สารมาตรฐาน maltoheptaose และ pullulan (P6000 และ P12000) (Sigma ประเทศสหรัฐอเมริกา)

## 2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

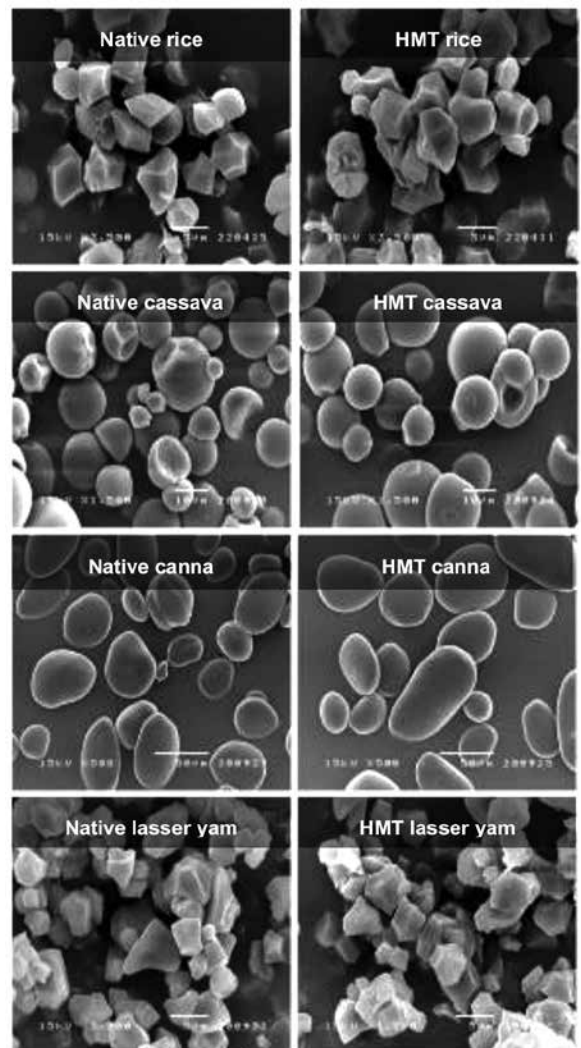
ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Statistical Package for the Social Science (SPSS for Windows) version 17.0 วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย Independent sample T test เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

### 3.1 รูปร่างลักษณะของเม็ดแป้ง

รูปร่างลักษณะของเม็ดแป้งข้าวเจ้า แป้งพุทธรักษา แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันมือเสือ ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันมือเสือมีขนาดเล็กและเกาะกันเป็นกลุ่ม เม็ดแป้งข้าวเจ้ามีพื้นผิวที่เรียบ รูปร่างหลายเหลี่ยม (polyhedral) ขนาดประมาณ 3-8 ไมครอน ในขณะที่เม็ดแป้งมันมือเสือมีขนาดเล็กกว่าเล็กน้อย (ประมาณ 2-6 ไมครอน) พื้นผิวเรียบและมีรูปร่างหลายเหลี่ยมเช่นกัน สำหรับเม็ดแป้งพุทธรักษา มีลักษณะรูปร่างยาวรี คล้ายรูปไข่แบน ผิวเรียบ ขนาดประมาณ 10-100

ไมครอน และเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะกลม ผิวเรียบ บางส่วนมีปลายตัด ขนาดประมาณ 7-20 ไมครอน เมื่อทำการตัดแปรแป้งด้วย HMT พบว่าเม็ดแป้งทุกชนิดมีขนาดและลักษณะไม่แตกต่างกันไปจากเดิม แสดงว่ากระบวนการ HMT ไม่ส่งผลต่อลักษณะของเม็ดแป้ง ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานส่วนใหญ่ที่พบว่า HMT ไม่ทำให้ลักษณะของเม็ดแป้งเปลี่ยนไป [24]

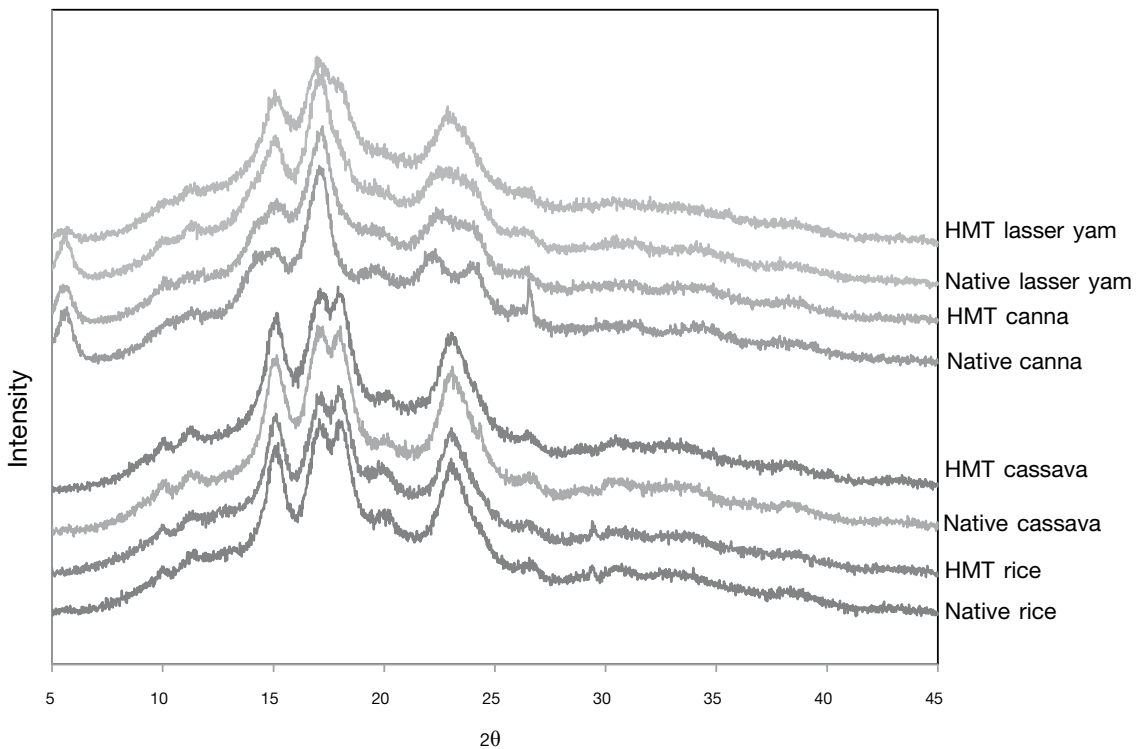


**รูปที่ 1** ภาพถ่ายจาก SEM ของเม็ดแป้งข้าวเจ้าและเม็ดแป้งมันมือเสือ (กำลังขยาย 3500 เท่า) เม็ดแป้งพุทธรักษาและเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (กำลังขยาย 500 เท่า) ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย HMT

### 3.2 โครงสร้างผลึกของแป้ง

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแป้งทั้งก่อนและหลังการตัดแปรด้วย HMT โดยใช้ X-ray diffractometer แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าจาก X-ray diffraction pattern ของแป้งข้าวเจ้าและมันสำปะหลังจะพบพีคหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta = 15^\circ$ , พีคคู่ที่  $17^\circ$  และ  $18^\circ$  และพีคเดี่ยวที่  $23^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A เมื่อทำการตัดแปรด้วย HMT พบว่า X-ray diffraction pattern ของแป้งทั้งสองชนิดยังมีลักษณะคงเดิม แสดงว่า HMT ไม่ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งแบบ A เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจเนื่องจากลักษณะผลึกของแป้งแบบ A เป็นแบบโมโนคลินิกที่มีน้ำประมาณ 4 โมเลกุล ในหนึ่งยูนิตเซลล์ ดังนั้นโครงสร้างในส่วนเกลียวคู่จึงขยับได้ยาก สำหรับ X-ray diffraction pattern ของแป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือมีลักษณะที่คล้ายกันคือพบพีคหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta = 5.6^\circ$  และ  $17^\circ$  และมีพีคคู่ (doublet) ที่  $22^\circ$  และ  $24^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B เมื่อทำการตัดแปรด้วย

HMT พบว่า X-ray diffraction pattern ของแป้งทั้งสองชนิดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม กล่าวคือ พีคที่ตำแหน่ง  $5.6^\circ$  จะเล็กลง พีคที่ตำแหน่ง  $17^\circ$  มีแนวโน้มที่จะแยกเป็นสองพีค และพีคคู่ที่  $22^\circ$  และ  $24^\circ$  มีแนวโน้มที่จะรวมตัวเป็นพีคเดี่ยว โดยแป้งมันมือเสือมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่า ซึ่งลักษณะของพีคที่เปลี่ยนไปบ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกของแป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือมีลักษณะของผลึกแบบ A รวมด้วย จึงจัดได้ว่าแป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือตัดแปรมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ C (A+B) เนื่องจากผลึกแบบ B เป็นแบบเฮกซะโกนัลที่มีน้ำประมาณ 36 โมเลกุล ในหนึ่งยูนิตเซลล์ ดังนั้นเกลียวคู่ของผลึกเมื่อได้รับความร้อนโดยมีน้ำเป็นพลาสติไซเซอร์จึงเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่าผลึกแบบ A ทำให้ผลึกแบบ B บางส่วนเปลี่ยนไปเป็นแบบ A การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกดังกล่าวนี้ทำให้คาดหมายได้ว่าการตัดแปรด้วย HMT จะส่งผลให้แป้งแบบ B มีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีกายภาพมากกว่าแป้งแบบ A

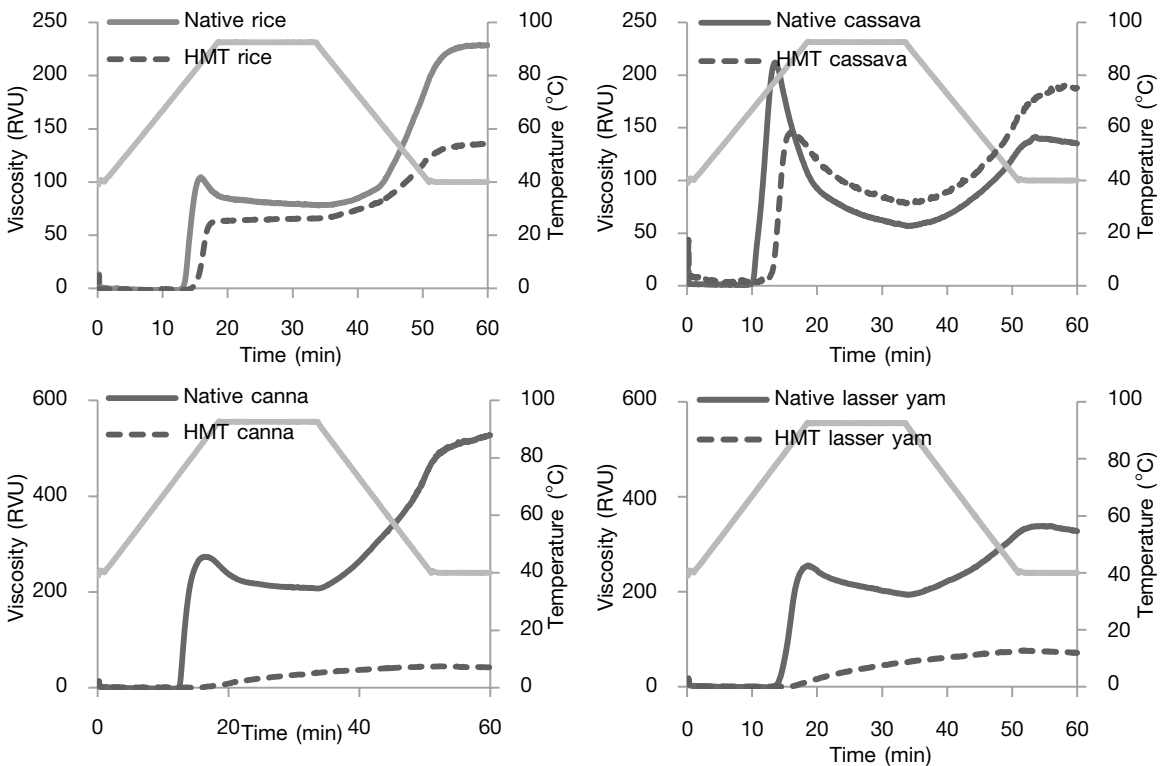


รูปที่ 2 X-ray diffraction pattern ของเม็ดแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือ ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย HMT

**3.3 สมบัติด้านความหนืด**

จากการศึกษาพฤติกรรมความหนืดของแป้งทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้น 8% ด้วยเครื่อง RVA ได้กราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดดังรูปที่ 3 พบว่าแป้งทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านการตัดแปรด้วย HMT มี pasting temperature, peak viscosity, breakdown viscosity และ setback viscosity ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ได้ตัดแปร โดยแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A (แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง) มีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดต่ำกว่าแป้งแบบ B (แป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือ) อย่างเห็นได้ชัด ผลที่ได้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของแป้งหลังการตัดแปรด้วย HMT ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 3.2 อย่างไรก็ตามแป้งในกลุ่มเดียวกันก็ยังพบความแตก-

ต่างของระดับในการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ แป้งในกลุ่ม A แป้งข้าวเจ้ามีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดระหว่างก่อนและหลังการตัดแปรต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง และแป้งในกลุ่ม B แป้งพุทธรักษามีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมากกว่าแป้งมันมือเสือ ทั้งนี้ แป้งมันมือเสือมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกมากกว่า ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งตัดแปร ซึ่งนอกจากโครงสร้างผลึกแล้วยังน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างส่วนอสัณฐานทั้งในชั้น semicrystalline growth ring และในชั้น amorphous growth ring ของเม็ดแป้งจากการตัดแปรด้วย HMT ที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งด้วย



**รูปที่ 3** กราฟความหนืดที่ได้จากเครื่อง RVA ของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือ ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย HMT

การลดลงของค่าความหนืดของแป้งตัดแปรเกิดจากการที่เม็ดแป้งมีความคงทนต่ออุณหภูมิและแรงกวนมากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งฟองตัวน้อยลง ปริมาณเม็ดแป้ง

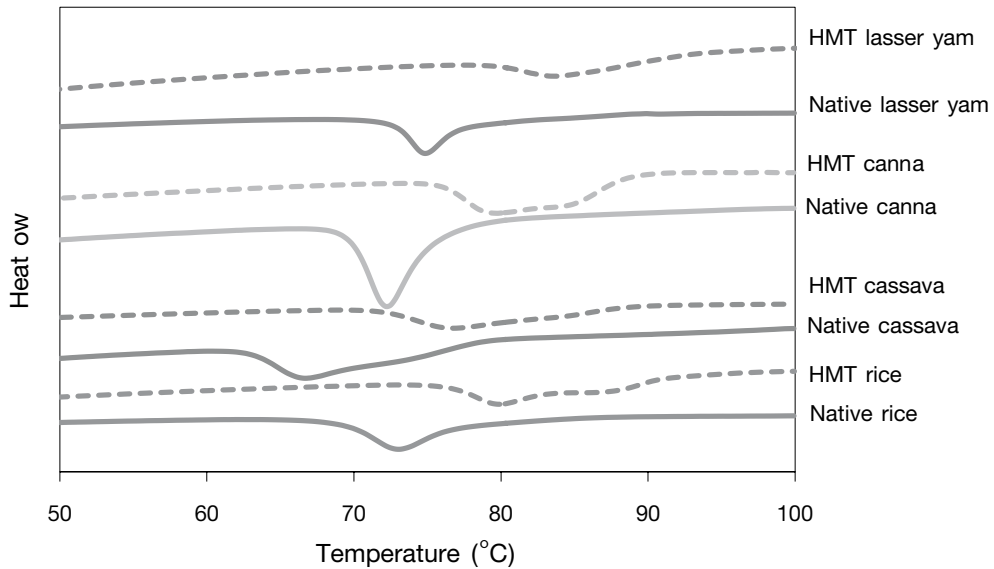
ที่เกิดการแตกหักลดลงดังรูปที่ 4 รวมทั้งการที่มีปริมาณอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้งลดลง เป็นผลให้โครงสร้างตาข่ายของเจลจากสตาร์ชตัดแปรเกิดได้ไม่ดี ดังนั้นค่า





ใช้ในการทำลายพันธะไฮโดรเจนของเกลียวคู่ทั้งส่วนที่อยู่ในรูปผลึกและไม่ใช่ผลึก [15] ดังนั้นการที่  $\Delta H$  ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการตัดแปรมีค่าลดลง แสดงว่าในระหว่าง

การตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น โครงสร้างเกลียวคู่ส่วนหนึ่งของเม็ดแป้งถูกทำลายไป ผลของค่า  $\Delta H$  ที่ได้ไม่สัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้ง



รูปที่ 5 เทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งพุทธรักษาและแป้งมันมือเสือ ก่อนและหลังการตัดแปรด้วย HMT

ตารางที่ 1 อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาตินเซชัน ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่เกิดเจลลาตินเซชันสูงสุด ( $T_p$ ) อุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดเจลลาตินเซชันและเอนทัลปีในการเกิดเจลลาตินเซชัน ( $\Delta H$ ) ของแป้งก่อนและหลังการตัดแปร

	$T_o$	$T_{p1}$ (°C)	$T_{p2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
Native rice	69.20*	73.10*	-*	77.93*	14.88 <sup>ns</sup>
HMT rice	76.18	79.98	86.26	91.23	15.42
Native cassava	62.96*	66.88*	-	77.53 <sup>ns</sup>	19.96*
HMT cassava	71.93	76.94	-	88.27	13.52
Native canna	69.67*	72.27*	-*	75.53*	24.84 <sup>ns</sup>
HMT canna	76.07	79.87	85.12	88.73	21.28
Native lasser yam	72.65*	74.85*	-	77.81*	12.20 <sup>ns</sup>
HMT lasser yam	79.06	83.85	-	93.72	11.17

\* ในแต่ละคู่ในแนวตั้งแสดงค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ns แสดงค่าความแตกต่างกันอย่างไม่มีความนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

### 3.5 การกระจายตัวของสายโซ่อะไมโลเพคติน

เพื่อศึกษาว่าการดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้นจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลเพคตินถูกทำลายหรือไม่ งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสายโซ่อะไมโลเพคตินที่แยกจากแป้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วยเครื่อง HPSEC ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า แป้งทุกชนิดก่อนและหลังการดัดแปรด้วย HMT มีความยาวสายโซ่เฉลี่ยไม่แตกต่างกัน การกระจายตัวของสายโซ่ที่มีความยาวขนาดต่างๆ ส่วนใหญ่ไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้นในแป้งมันสำปะหลังที่มีสัดส่วนของสายโซ่ที่มีความยาว 6-12

และ 13-24 หน่วยกลูโคส และแป้งพุทธรักษาที่มีสัดส่วนของสายโซ่ที่มีความยาว 6-12 หน่วยกลูโคส เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย แสดงว่าการดัดแปรด้วย HMT โดยสภาวะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ทำให้โครงสร้างของอะไมโลเพคตินถูกทำลาย โดยถ้า HMT มีผลต่อโครงสร้างน่าจะทำให้ความยาวสายโซ่เฉลี่ยลดลงและการกระจายตัวของสายโซ่ที่มีความยาวขนาดต่างๆ เปลี่ยนไปในทิศทางที่จะมีสัดส่วนของสายโซ่ขนาดเล็กมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการดัดแปรด้วย HMT ไม่ทำลายโครงสร้างของอะไมโลเพคติน

**ตารางที่ 2** การกระจายตัวของความยาวสายโซ่อะไมโลเพคตินของแป้งก่อนและหลังการดัดแปรด้วย HMT วิเคราะห์โดย HPSEC

Starch	Average chain length (glucose unit)	Distribution (%)			
		DP 6-12	DP 13-24	DP 25-36	DP ≥ 37
Native rice	18.29 <sup>ns</sup>	41.44 <sup>ns</sup>	41.90 <sup>ns</sup>	6.57 <sup>ns</sup>	10.08 <sup>ns</sup>
HMT rice	18.82	40.44	42.52	6.57	10.47
Native cassava	18.51 <sup>ns</sup>	45.05*	35.79*	7.18 <sup>ns</sup>	11.98 <sup>ns</sup>
HMT cassava	18.54	44.16	36.59	7.57	11.67
Native canna	23.51 <sup>ns</sup>	27.80*	44.95 <sup>ns</sup>	9.43 <sup>ns</sup>	17.83 <sup>ns</sup>
HMT canna	23.09	29.18	44.20	8.92	17.70
Native lasser yam	20.15 <sup>ns</sup>	35.62 <sup>ns</sup>	43.69 <sup>ns</sup>	8.25 <sup>ns</sup>	12.44 <sup>ns</sup>
HMT lasser yam	19.94	36.05	43.22	8.53	12.20

\* ในแต่ละคู่ในแนวตั้งแสดงค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ns แสดงค่าความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

### 4. สรุปผล

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B เมื่อดัดแปรด้วยการใช้ความร้อนขึ้น ลักษณะโครงสร้างผลึกและความหนืดของแป้งสูงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงมากกว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A อย่างไรก็ตามแป้งต่างชนิดกันแต่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันก็ยังมีพบความแตกต่างของระดับการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นลักษณะโครงสร้างผลึกของอะไมโลเพคตินจึงไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง งานวิจัยนี้พบว่าโครงสร้างของอะไมโลเพคตินไม่ถูก

ทำลายแต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะไมโลเพคตินเปลี่ยนไป สำหรับอะไมโลสซึ่งเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญของเม็ดแป้งก็อาจมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งจึงควรจะทำการศึกษาต่อไปเพื่อให้สามารถเข้าใจกระบวนการดัดแปรโดยใช้ความร้อนขึ้นได้ดีขึ้น นอกจากนี้จากความรู้ที่ได้จากงานวิจัยที่พบว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A จะดัดแปรได้ยากกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกที่แน่น ดังนั้นจึงควรหาวิธีการที่จะไปกระตุ้นการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเกลียวคู่ไว้ซึ่งจะทำให้แป้งแบบ A จัดเรียงตัวใหม่ได้ง่ายขึ้น หรือในทาง

กลับกันอาจหาวิธีการที่จะไปกระตุ้นให้เกิดการสร้างผลึกมากขึ้นในระหว่างการตัดแปรร ในแง่ของการนำแป้งตัดแปรรไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์ สมบัติสำคัญของแป้งที่ต้องพิจารณาคือ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดเมื่อให้ความร้อน พบว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีผลึกแบบ A เมื่อทำการตัดแปรรด้วยความร้อนขึ้น แป้งสูงมีความคงตัวต่อความร้อนและแรงกวนมากขึ้น นอกจากนี้ การปรับสภาวะในการตัดแปรรจะช่วยให้ได้แป้งตัดแปรรที่มีคุณภาพด้านความหนืดที่ตรงตามความต้องการในผลิตภัณฑ์เฉพาะอย่างมากขึ้น

## 5. เอกสารอ้างอิง

1. Adebawale, A.A., Sanni, L.O. and Awonorin, S.O., 2005, "Effect of Texture Modifiers on the Physicochemical and Sensory Properties of Dried Fufu," *Food Science and Technology International*, 11 ( 5), pp. 373-382.
2. Adebawale, K.O. and Lawal, O.S., 2003, "Funtional Properties and Retrogradation Behaviour of Native and Chemically Modified Starch of Mucuna Bean (*Mucuna Pruriens*)," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83 (15), pp. 1541-1546.
3. Collado, L.S. and Corke, H., 1999, "Heat-Moisture Treatment Effects on Sweetpotato Starches Differing in Amylose Content," *Food Chemistry*, 65 (3), pp. 339-346.
4. Gunaratne, A. and Hoover, R., 2002, "Effect of Heat-Moisture Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Tuber and Root Starches," *Carbohydrate Polymers*, 49 (4), pp. 425-437.
5. Hoover, R. and Manuel, H., 1996, "The Effect of Heat-Moisture Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Normal Maize, Waxy Maize, Dull Waxy Maize and Amylomaize V Starches," *Journal of Cereal Science*, 23 (2), pp. 153-162.
6. Horndok, R. and Noomhorm, A., 2007, "Hydrothermal Treatment of Rice Starch for Improvement of Rice Noodle Quality," *Journal of Food Science and Technology*, 61, pp. 1-9.
7. Lawal, O.S., 2005, "Studies on the Hydrothermal Modifications of New Cocoyam (*Xanthosoma Sagittifolium*) Starch," *International Journal of Biological Macromolecules*, 37 (5), pp. 268-277.
8. Lim, S.T., Chang, E.H. and Chung, H.J., 2001, "Thermal Transition Characteristics of Heat-Moisture Treated Corn and Potato Starches," *Carbohydrate Polymers*, 46 (2), pp. 107-115.
9. Megumi, M. and Naofumi, M., 2005, "Effect of Heat-Moisture Treated Maize Starch on the Properties of Dough and Bread," *Food Research International*, 38 (4), pp. 369-376.
10. Olayinka, O.O., Adebawale, K.O. and Olu-Owolabi, B. I., 2008, "Effect of Heat-Moisture Treatment on Physicochemical Properties of White Sorghum Starch," *Food Hydrocolloids*, 22 (2), pp. 225-230.
11. Pukkahuta, C., Suwannawat, B., Shobsngob, S. and Varavinit, S., 2008, "Comparative Study of Pasting and Thermal Transition Characteristics of Osmotic Pressure and Heat-Moisture Treated Corn Starch," *Carbohydrate Polymers*, 72 (3), pp. 527-536.
12. Takaya, T., Sano, C. and Nishinari, K., 2000, "Thermal Studies on the Gelatinization and Retrogradation of Heat-Moisture Treated Starch," *Carbohydrate Polymers*, 41 (1), pp. 97-100.
13. Watcharatewinkul, Y., Puttanlek, C., Rungsardthong, V. and Uttapap, D., 2009, "Pasting Properties of a Heat-Moisture Treated Canna Starch in Relation to Its Structural Characteristics," *Carbohydrate Polymers*, 75 (3), pp. 505-511.
14. Purwani, E.Y., Widaningrum, R.T. and Muslich, 2006, "Effect of Heat Moisture Treatment

of Sago Starch on Its Noodle Quality,” *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 7 (1), pp. 8-14.

15. Abraham, T.E., 1993, “Stabilization of Paste Viscosity of Cassava Starch by Heat Moisture Treatment,” *Starch - Stärke*, 45 (4), pp. 131-135.

16. Matsunaga, K., Kawasaki, S. and Takeda, Y., 2003, “Influence of Physicochemical Properties of Starch on Crispness of Tempura Fried Batter,” *Cereal Chemistry*, 80 (3), pp. 339-345.

17. Stute, R., 1992, “Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture -Treatment,” *Starch - Stärke*, 44 (6), pp. 205-214.

18. French, D., 1984, *Starch Chemistry and Technology*, Academic Press, London.

19. Pancha-arnon, S. and Uttapap, D., 2013, “Rice Starch Vs. Rice Flour : Differences in Their Properties When Modified by Heat-Moisture Treatment,” *Carbohydrate Polymers*, 91 (1), pp. 85-91.

20. Pancha-arnon, S., Jiranantakul, W. and Uttapap, D., 2014, “Physicochemical Properties and Amylopectin Structure of Yam Starch (*Dioscorea Hispidata* Dennst.) and Lasseryam Starch (*Dioscorea Esculenta* (Lour.) Burkill),” *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 185-198.

21. Jiranuntakul, W., Pancha-arnon, S. and Uttapap, D., 2014, “Enhancement of Octenyl Succinylation of Cassava Starch by Prior Modification with Heat-Moisture Treatment,” *Starch/Stärke*, 66, pp. 1-8.

22. Pancha-arnon, S., Pathipanawat, W., Puttanlek, C., Rungsardthong, V. and Uttapap, D., 2008, “Effects of Relative Granule Size and Gelatinization Temperature on Paste and Gel Properties of Starch Blends,” *Food Research International*, 41 (5), pp. 552-561.

23. Takeda, Y., Hizukuri, S. and Juliano, B.O.,

1986, “Purification and Structure of Amylose from Rice Starch,” *Carbohydrate Research*, 148 (2), pp. 299-308.

24. Jiranuntakul, W., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., Pancha-arnon, S. and Uttapap, D., 2011, “Microstructural and Physicochemical Properties of Heat-Moisture Treated Waxy and Normal Starches,” *Journal of Food Engineering*, 104 (2), pp. 246-258.

25. Anderson, A.K. and Guraya, H.S., 2006, “Effects of Microwave Heat-Moisture Treatment on Properties of Waxy and Non-Waxy Rice Starches,” *Food Chemistry*, 97 (2), pp. 318-323.

26. Emrat, I., Wandee, Y., Pancha-arnon, S. and Uttapap, D., 2011, “Modification of Canna Starch by Cross-Linking with Sodium Trimetaphosphate,” *KMUTT Research and Development Journal*, 34 (4), pp. 357-368.

27. Tester, R.F., Debon, S.J. and Karkalas, J., 1998, “Annealing of Wheat Starch,” *Journal of Cereal Science*, 28 (3), pp. 259-272.

28. Khunae, P., Tran, T., and Sirivongpaisal, P., 2007, “Effect of Heat-Moisture Treatment on Structural and Thermal Properties of Rice Starches Differing in Amylose Content,” *Starch/Stärke*, 59 (12), pp. 593-599.

29. Shih, F., King, J., Daigle, K., An, H.J. and Ali, R., 2007, “Physicochemical Properties of Rice Starch Modified by Hydrothermal Treatments,” *Cereal Chemistry*, 84 (5), pp. 527-531.

30. Donovan, J.W., Lorenz, K. and Kulp, K., 1983, “Differential Scanning Calorimetry of Heat-Moisture Treated Wheat and Potato Starches,” *Cereal Chemistry*, 60 (5), pp. 381-387.

31. Hoover, R., Vasanthan, T., Senanayake, N.J. and Martin, A.M., 1994, “The Effects of Defatting and Heat-Moisture Treatment on the Retrogradation of Starch Gels from Wheat, Oat, Potato, and

- Lentil," *Carbohydrate Research*, 261 (1), pp. 13-24.
32. Vermeulen, R., Goderis, B. and Delcour, J. A., 2006, "An X-Ray Study of Hydrothermally Treated Potato Starch," *Carbohydrate Polymers*, 64 (2), pp. 364-375.