

## ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเตรียมเจล ต่อสมบัติฟิล์มแข็งพหุทธรักษาгинได้ขึ้นรูปโดยวิธี solvent casting

สายตะวัน เลี้ยวสุด<sup>1</sup> ดุษฎี อุดภาพ<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

และ จุรีรัตน์ พุดตาลเล็ก<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม 73000

รับเมื่อ 4 มกราคม 2551 ตอรับเมื่อ 2 กันยายน 2551

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าประอบทางเคมีของแข็งพหุทธรักษาгинได้พนักุ้ไทยม่วงและผลของอุณหภูมิที่ 80, 100 และ 121°C ระยะเวลา 5, 20 และ 60 นาที ในการเตรียมเจล (ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยวิธี solvent casting) ต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มจากแข็งพหุทธรักษาгинได้พนักุ้ไทยม่วง พบว่าแข็งพหุทธรักษาгинได้พนักุ้ไทยม่วงมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 27.93 ฟอสฟอรัส 454 ppm และมีปริมาณแถ้า โปรตีน ไขมันเพียงเล็กน้อย เจลแข็งมีลักษณะการพองตัวและแตกตัวของเม็ดแข็งมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่้ำแข็ง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้น ลักษณะของเม็ดแข็งไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แผ่นฟิล์มแข็งพหุทธรักษามีลักษณะใสโปร่งแสง ผิวเรียบทั้งสองด้านและมีรอยแตกร้าวล็กน้อยบริเวณขอบ ฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 35-46  $\mu\text{m}$  โดยพบว่าที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่้ำแข็งที่ 121°C นาน 20 นาทีร่วมกับการให้ความดัน พื้นผิวฟิล์มมีความเรียบมากที่สุดและมีโครงร่างผลึกแบบ B-type ค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่้ำแข็งที่ 80°C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 43.50 เป็น 50.93 MPa แต่ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่้ำแข็งที่ 100°C โดยใช้ระยะเวลาต่างๆ พบว่าแผ่นฟิล์มมีค่าความต้านทานแรงดึงขาดใกล้เคียงกัน (ประมาณ 50 MPa) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่้ำแข็ง แผ่นฟิล์มมีค่าการยึดตัวและค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนลดลงโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.92-8.90 และ 0.021-0.294  $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$  ตามลำดับ ส่วนค่าการซึมผ่านไอน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่้ำแข็ง แผ่นฟิล์มแข็งพหุทธรักษาгинได้เตรียมจากทุกสภาวะมีค่าการละลายอยู่ในช่วงร้อยละ 0.66-1.15

**คำสำคัญ :** แข็งพหุทธรักษาгинได้ / ฟิล์มแข็ง / เจลาตินเซชัน / สมบัติของฟิล์ม

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

## Effect of Gelatinization Temperature and Time on Properties of Edible Canna Starch Films Formed by Solvent Casting Technique

Saitawan Leovasut <sup>1</sup>, Dudsadee Uttapap <sup>2</sup>,

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

and Chureerat Puttanlek <sup>3</sup>

Silpakorn University, Sanarm Chand Palace Campus, Nakhon Pathom 73000

*Received 4 January 2008 ; accepted 2 September 2008*

### Abstract

The aims of this research are to study chemical composition of edible canna starch (Thai-purple variety) and effects of gelatinization temperature (80, 100 and 121°C) and time (5, 20 and 60 min) on properties of edible canna starch films formed by solvent casting technique. Amylose and phosphorus contents of Thai-purple canna starch were 27.93% and 454 ppm, respectively, whereas ash, protein and lipid contents were negligible. An increase in the gelatinization temperature resulted in a considerable change in swelling and disintegration of starch granules. However, the swelling was not significantly different when the gelatinization time was extended. Films of edible canna starch were smooth and translucent and a few cracks at the edges were found. Thickness of the films was in the range of 35 to 46 µm. Gelatinization at 121°C for 20 min under pressure gave the smoothest film with a B-type crystalline structure. Tensile strength of the films gelatinized at 80°C increased when the time of gelatinization increased (from 43.50 to 50.93 MPa), but those at 100°C were not different (about 50 MPa). On the other hand, elongation and oxygen permeability decreased from 8.90 to 5.92% and 0.294 to 0.021 cm<sup>3</sup>·µm /m<sup>2</sup>·d·kPa, respectively, when gelatinization temperature and time increased. Water vapor permeability tended to decrease when the gelatinization temperature increased. Solubility of the films in water was in the range of 0.66 to 1.15%.

**Keywords :** Edible Canna Starch / Starch Film / Gelatinization / Film Properties

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

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

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Engineering and Industrial Technology.

## 1. บทนำ

สารพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มมีทั้งที่ได้จากการสังเคราะห์ (synthetic polymer) และจากธรรมชาติ (natural polymer) เช่น ไชมัน โปรตีน แป้ง ซึ่งแป้งมีข้อดีหลายประการ อาทิ ย่อยสลายได้ง่าย ราคาถูกและหาได้ง่าย ปลอดภัยและมีคุณสมบัติที่หลากหลายขึ้นกับชนิดของแป้ง จากข้อดีของแป้งดังกล่าวจึงเป็นที่สนใจในการนำแป้งมาใช้เตรียมฟิล์ม โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000-6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage อาจพบกึ่งกันสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย [1] อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาเป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี degree of polymerization (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วยที่จุดแตกกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,6-glycosidic linkage โดยโมเลกุลของอะไมโลสสามารถเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมในการฟอร์มเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรง ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มจากแป้งจึงนิยมเตรียมจากแป้งที่มีอะไมโลสสูง

การขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธี solvent casting เป็นการเตรียมฟิล์มโดยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่เหมาะสม นำมาเทลงบนภาชนะเฉพาะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มและระเหยตัวทำละลายออกแล้วทำการลอกแผ่นฟิล์มในกรณีของแป้งจะทำการเจลาติไนซ์แป้งในน้ำเพื่อให้เม็ดแป้งแตกออกก่อนนำไปขึ้นรูป ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มจากแป้งด้วยวิธี solvent casting คือ ชนิดและความเข้มข้นของแป้ง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้ง อุณหภูมิของน้ำแป้งก่อนทำการเทลงบนแม่พิมพ์ อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ระเหยตัวทำละลาย ชนิด และปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เป็นต้น นอกจากปริมาณอะไมโลสซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดฟิล์มแล้ว ระดับการแตกตัวของเม็ดแป้งที่เหมาะสมก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากจะมีผลต่อการกลับมาจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแป้งเจลาติไนซ์

มีตั้งแต่ 95-160°C โดยใช้เวลา 10 นาที ถึง 3 ชั่วโมง ขึ้นกับชนิดของแป้ง [2-5] Bengtsson และคณะ [5] ได้ทำการผลิตฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งที่มีอะไมโลสสูง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนเท่ากันและใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบเม็ดแป้ง พบว่าที่อุณหภูมิ 100°C เม็ดแป้งมีการพองตัวมากแต่ยังไม่แตกออกจากกัน ที่อุณหภูมิ 120°C เม็ดแป้งเริ่มเกิดการแตกตัว และที่อุณหภูมิ 130°C เม็ดแป้งมีการแตกตัวอย่างสมบูรณ์ แต่ลักษณะปรากฏของฟิล์มจากทั้ง 3 กรณี พบว่ามีลักษณะคล้ายกันคือ มีความสม่ำเสมอ เรียบและค่อนข้างโปร่งแสง Koskinen และคณะ [6] เตรียมฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งและแป้งบาร์เลย์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (w/w) เติมกลี เซอรอลในอัตราส่วนแป้ง:กลีเซอรอล 100:33 นำน้ำแป้งไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 121 และ 180°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วเทน้ำแป้งลงบนแม่พิมพ์เทฟลอนและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 20°C พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจะทำให้ฟิล์มจากแป้งทั้งสองชนิดมีความหนาและการยึดตัวลดลง แต่ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น Thire และคณะ [7] เตรียมฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C ที่ระยะเวลา 5, 20, 50 และ 90 นาที แล้วนำสารละลายเทใส่ petri dish ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ฟิล์มที่ได้จากแป้งที่ให้ความร้อนนาน 5 และ 20 นาที ยังคงเหลือโครงสร้างของเม็ดแป้งบางส่วน แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 50 และ 90 นาที ไม่พบโครงสร้างเม็ดแป้งเหลืออยู่และฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

พุทธรักษาถิ่นได้เป็นพืชเก่าแก่ชนิดหนึ่งของโลก ตามหลักฐานทางโบราณคดีที่ขุดพบในบริเวณ Hu aca Prieta บนชายฝั่งเปรู ยืนยันว่ามนุษย์รู้จักนำพุทธรักษาถิ่นได้มาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ประมาณ 2500 ปีก่อนคริสตศักราช หรือก่อนอาหารแป้งอื่นๆ พุทธรักษาถิ่นได้ที่พบในประเทศไทยมีอยู่ 2 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์ที่มีใบสีเขียว เรียกว่า ไทยเขียว (Thai-green) และสายพันธุ์ที่มีใบสีเขียวนม่วง เรียกว่า ไทยม่วง (Thai-purple) โดยพุทธรักษาถิ่นได้สามารถปรับตัวเข้ากับดินและสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี มีโรคและแมลงรบกวนน้อย ทนต่อร่มเงา อีกทั้งยังมี

ผลผลิตต่อพื้นที่สูง [8] จากการศึกษาสมบัติของแป้ง พุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วงพบว่ามีความชื้นแฉะไม่ไหลปรกฏอยู่ในช่วงร้อยละ 21-28 และมีค่ารีโทรแกรเดชันซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter อยู่ในช่วงร้อยละ 67-82 [9] ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งในกระบวนการผลิตเส้นเส้นจากแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วงในประเทศเวียดนามโดยใช้เทคนิค steam-sheeting ซึ่งต้องนำแป้งมาเตรียมเป็นฟิล์มก่อน พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่เด่นคือ กึ่งโปร่งใส มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง จากสมบัติดังกล่าวข้างต้นจึงน่าสนใจในการทดลองเตรียมฟิล์มจากแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วง เพื่อเป็นแนวทางในการนำฟิล์มที่ได้ไปใช้ประโยชน์โดยอาจนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มสำหรับเคลือบอาหารหรือพัฒนาเป็นฟิล์มสำหรับบรรจุต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดังกล่าวถึงผลของปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งในกระบวนการเตรียมฟิล์มจากแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วงโดยวิธี solvent casting และทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มแป้งที่ได้

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

### วัตถุดิบ

- แป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วง ได้สายพันธุ์ไทยม่วง เก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง
- แผ่นแป้งเหนียวเนื่องทางการค้า

### วิธีการทดลอง

#### การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งพุทธรักษา

- ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีนและเถ้าตามวิธีของ AOAC [10]
- ปริมาณฟอสฟอรัสตามวิธีของ Smith และ Caruso [11]
- ปริมาณอะไมโลสตามวิธีของ Ratnayake [12]

#### การเตรียมฟิล์มจากแป้งพุทธรักษา

ทำการเตรียมฟิล์มจากแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วงโดยใช้น้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 3 (dwb) นำน้ำแป้งมาเจลาติไนซ์ที่สภาวะดังนี้: อุณหภูมิ 80 และ 100°C เป็น

เวลา 5, 20 และ 60 นาทีโดยทำการกวนตลอดเวลา และที่อุณหภูมิ 80°C นาน 20 นาที โดยทำการกวนตลอดเวลาแล้วนำน้ำแป้งที่ได้ไปให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 121°C ภายใต้แรงดัน 15 psi นาน 20 นาที โดยใช้หม้อหุงต้มความดันไอน้ำ นำน้ำแป้งที่เจลาติไนซ์แล้วมาตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเหลือ 70°C แล้วเทน้ำแป้งลงบนแผ่นกระดาษขนาด 26X29 ซม. ซึ่งฉาบด้วยฟิล์มพลาสติก (polyvinylchloride) จนเรียบตึงและทำขอบให้มีความหนา 1.6 มม. นำไประเหยตัวทำละลายโดยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นลอกแผ่นฟิล์มแป้งออก แล้วนำไปเก็บในเดซีเคเตอร์เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล

#### การศึกษาลักษณะของเจลแป้งก่อนขึ้นรูปฟิล์ม

นำเจลแป้งที่เตรียมได้ในสภาวะต่างๆ มาปาดบางๆ ลงบนกระดาษลิตมัส แล้วหยดสารละลายไอโอดีนเพื่อให้เห็นเม็ดแป้งได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นปิดด้วยกระดาษปิดลิตมัสแล้วนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Olympus รุ่น DP 70 ประเทศญี่ปุ่น) โดยใช้กำลังขยาย 200 เท่า

#### การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

##### สมบัติทางกายภาพ

- ความหนา วัดความหนาของฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อ E. J. CADY & CO รุ่น T.T. ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการวัดฟิล์มตัวอย่างละ 2 แผ่นที่ตำแหน่งต่างๆ กัน 16 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 2 ซ้ำ
- ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม วิเคราะห์โดยนำฟิล์มติดบน bronze stub (ให้ด้านสัมผัสอากาศวางไว้ด้านบน) โดยใช้เทปกาวสองหน้า แล้วทำการเคลือบด้วยทองให้มีความหนา 40-50 นาโนเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (JSM-5800, JEOL, ประเทศญี่ปุ่น)
- ลักษณะโครงสร้างผลึก ตัดแผ่นฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความยาวของแต่ละด้านเท่ากับ 5 ซม. แล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (Rotaflex RV-20013, Rigaku Denki Co., ประเทศญี่ปุ่น)

**สมบัติทางกล**

- ความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัว (tensile strength and elongation) ตัดแปลงจาก ASTM D882-88 [13] โดยใช้ Texture Analyzer (TA-XT2i, Stable Micro System Co., Ltd., ประเทศอังกฤษ) ใช้หัววัด Tensile grip ค่า Load cell เท่ากับ 25 กก. โดยให้มีระยะห่าง

ระหว่างหัวหนีบเท่ากับ 50 มม. และมีค่า cross-head เท่ากับ 50 มม./นาที ตัดตัวอย่างฟิล์มจำนวน 10 ชิ้น ให้มีความกว้าง 25.4 มม. และความยาว 100 มม. นำไปเก็บในสภาวะที่กำหนดคือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50+5% อุณหภูมิ 23+2°C เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ

$$\text{ค่าความต้านทานแรงดึงขาด (MPa)} = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้ (N)}}{\text{ความกว้าง (มม.)} \times \text{ความหนาของฟิล์ม (มม.)}}$$

$$\text{ค่าการยืดตัว (\%)} = \frac{\text{ระยะยืดตัวของชิ้นทดสอบ} \times 100}{\text{ความยาวเดิมของชิ้นตัวอย่างระหว่างหัวทดสอบ (มม.)}}$$

**สมบัติทางเคมีกายภาพ**

- การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (oxygen permeability) ตามวิธี ASTM D3985-81 [14] ด้วยเครื่องมือทดสอบค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeation Analyzer, Model 8000 บริษัท Illiois Instrument) ตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับ template โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 ซม. นำไปเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วันก่อนทำการทดสอบ นำชิ้นตัวอย่างมาวางตรงกลางของเซลล์แล้วปิดฝาเซลล์ ปล่อยก๊าซไนโตรเจน

เข้าไปในเซลล์ก่อนเพื่อไล่อากาศภายในเซลล์ โดยให้มีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 25 มล./นาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่มีความดัน 50 psi (344.74 kPa) ก๊าซทางด้านที่มีความดันสูงจะสามารถแพร่ผ่านฟิล์มไปยังอีกด้านหนึ่ง บันทึกค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่อ่านได้จนกระทั่งค่าที่อ่านได้จะเป็นปริมาตรของก๊าซที่วัดได้จากการซึมผ่าน ซึ่งจะคงที่ ณ อุณหภูมิและพื้นที่ผิวที่กำหนดมีหน่วยเป็น  $\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$

$$\text{oxygen transmission (OTR) (cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d)} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซที่ซึมผ่าน}}{\text{เวลา} \times \text{พื้นที่}}$$

$$\text{oxygen transmission (OTR) (cm}^3/\mu\text{m}^2 \cdot \text{d kPa)} = \frac{\text{OTR}}{P_1 - P_2} \times \text{ความหนา}$$

เมื่อ  $P_1$  = ความดันก๊าซที่ปล่อยเข้า

$P_2$  = ความดันก๊าซที่บรรยากาศ

โดยที่ 1 atm = 14.696 psi = 1.01325x10<sup>5</sup> Pa

- การซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability) ตามวิธี ASTM E96-80 [15] เครื่องมือทดสอบประกอบด้วยถ้วยอะลูมิเนียมและวงแหวนอะลูมิเนียม ตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. 2 ซ้ำ ใส่แคลเซียมคลอไรด์ที่ผ่านการอบแห้งแล้วในถ้วยอะลูมิเนียม

ให้สูงประมาณ 6 มม. วางชิ้นตัวอย่างที่เตรียมลงบนถ้วยวางวงแหวนอะลูมิเนียมที่บนลงบนชิ้นตัวอย่าง ปิดผนึกด้วยซีตัสสีขาวหรือพาราฟินเพื่อป้องกันมิให้อากาศรั่วเข้าไปในถ้วยอะลูมิเนียม นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นน้ำหนักที่เวลา 0 ชั่วโมง เก็บในสภาวะที่กำหนด คือ 27+2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65+2% จากนั้นจึงบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 4 วัน นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (แกน y) กับเวลา (แกน x)

$$\text{water vapor transmission (WVTR) (ก./ม.}^2\cdot\text{d)} = \frac{G/t}{\text{พื้นที่}}$$

$$\text{water vapor permeability (WVTR) (ก.}\cdot\text{มม./ม.}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa)} = \frac{\text{WVTR} \times \text{ความหนา}}{S (R_1 - R_2)}$$

เมื่อ  $S$  = ค่าความดันไออิ่มตัววดยิ่งที่  $25^{\circ}\text{C} = 23.76 \text{ mm Hg}$  ( $0.1333 \times 10^3 \text{ pascal} = 1 \text{ mm Hg}$ )

$G/t$  = ความชันที่เป็นเส้นตรงของกราฟระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ( $g$ ) และเวลา ( $24$  ชั่วโมง)

$R_1$  = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ บรรยากาศห้องทดสอบ = ร้อยละ 65

$R_2$  = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ บรรยากาศด้วยทดสอบ = ร้อยละ 0

- **การละลายในน้ำ** (solubility in water) ดัดแปลงจากวิธีของ Gontard และคณะ [16] วัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักฟิล์มที่หายไปเมื่อแช่ในน้ำเป็นเวลา  $24$  ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้ เริ่มต้นตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาด  $50 \times 50$  มม.<sup>2</sup> (แผ่นฟิล์มตัวอย่าง 1 แผ่นจะสุ่มตัดที่ตำแหน่งต่างๆ มา 3 ชิ้น) นำไปอบแห้งที่  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $24$  ชั่วโมงแล้วนำมาชั่งน้ำหนักบันทึกค่าเป็น  $DM_0$  นำชิ้นทดสอบเหล่านี้ไปแช่ในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร  $50$  มล. ใส่ sodium azide  $0.02$  ก./ $100$  มล. เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แล้วทำการปิดปากขวดด้วยพาราฟิน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $24$  ชั่วโมงใน shaking incubator เมื่อครบกำหนดนำฟิล์มที่ไม่ละลายในน้ำมาทำให้แห้งที่  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $24$  ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าเป็น  $DM_{24}$

$$\text{Solubility} = \frac{(DM_0 - DM_{24})}{DM_0} \times 100$$

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 องค์ประกอบของแป้งพุดดิ้งพืชพันธุ์ไทยม่วง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งพุดดิ้งพืชพันธุ์ไทยม่วงพบว่าปริมาณความชื้นร้อยละ  $9.77$  เถ้า

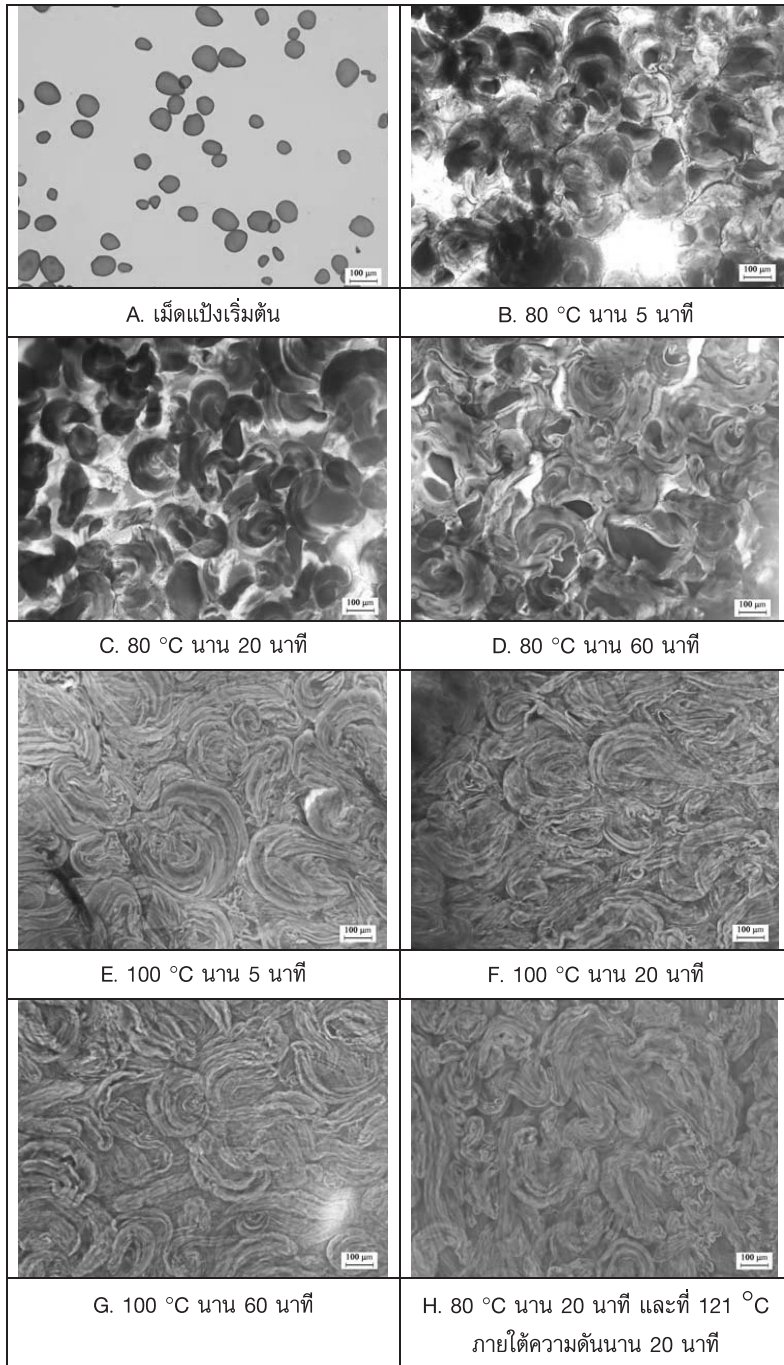
ร้อยละ  $0.12$  อะไมโลสร้อยละ  $27.9$  ฟอสฟอรัส  $454$  ppm โปรตีนร้อยละ  $0.072$  และตรวจไม่พบไขมัน เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานวิจัยของวัชรินทร์ จันทรสุวรรณ [17] ซึ่งวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งพุดดิ้งพืชพันธุ์เดียวกันพบว่าปริมาณอะไมโลสและฟอสฟอรัสมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยในส่วนของปริมาณอะไมโลสผลที่แตกต่างนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยวัชรินทร์ จันทรสุวรรณ [17] ใช้ high performance size exclusion chromatography ในการแยกอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีขนาดและมวลของโมเลกุลต่างกัน แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน โดยจากรายงานของ Thitipraphunkul และคณะ [9] พบว่าอะไมโลเพคตินของแป้งพุดดิ้งพืชพันธุ์ไทยม่วงซึ่งมีสายโซ่กิ่งเฉลี่ยที่ยาว ดังนั้นสายโซ่ที่ยาวเหล่านี้อาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนทำให้ค่าอะไมโลสที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง หรืออีกส่วนหนึ่งอาจเนื่องจากสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกที่ต่างกันทั้งด้านดินที่ปลูกและสภาพอากาศ โดยแป้งตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยของวัชรินทร์ จันทรสุวรรณ [17] ได้จากต้นพุดดิ้งที่ปลูกในจังหวัดนครราชสีมาซึ่งมีสภาพอากาศที่ค่อนข้างร้อนลักษณะดินเป็นดินแดง แต่พุดดิ้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ปลูกที่จังหวัดระยองซึ่งเป็นพื้นที่ภาคตะวันออกมีลักษณะอากาศแบบร้อนชื้นและมีลักษณะดินเป็นดินทรายสภาพแวดล้อมที่มีความแตกต่างกันอาจส่งผลให้องค์ประกอบของแป้งจากพืชชนิดเดียวกันมีความแตกต่างกันได้

#### 3.2 ลักษณะของเจลแป้งก่อนขึ้นรูปฟิล์ม

ลักษณะของเจลแป้งที่เตรียมที่อุณหภูมิ  $80$  และ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $5$ ,  $20$  และ  $60$  นาที และที่อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  นาน  $20$  นาที ภายใต้ความดัน เมื่อนำมาย้อมสีด้วยไอโอดีนและวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย  $200$  เท่า แสดงดังรูปที่ 1 เม็ดแป้งพุดดิ้งที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีรูปร่างกลมรีแบน เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่อยู่

ในช่วง 25-90  $\mu\text{m}$  โดยมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน (รูปที่ 1-A) เมื่อนำน้ำแข็งไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลา 5 และ 20 นาที เจลแข็งจะมีลักษณะดังรูปที่

1-B และ 1-C โดยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ มีการพองตัวหรือแตกตัวน้อยและยังคงสภาพเป็นเม็ดแข็งอยู่ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็น 60 นาที



รูปที่ 1 ลักษณะเม็ดแข็งและเจลแข็งพหุรักษษาที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

(รูปที่ 1-D) พบว่าเม็ดแป้งมีการพองตัวและแตกมากขึ้น โดยลักษณะการแตกของเม็ดแป้งจะแตกออกทางปลายด้านหนึ่งของเม็ด แป้งยังสังเกตเม็ดแป้งที่ติดสีน้ำเงินเข้มเหลืออยู่บางส่วน รูปที่ 1-E, 1-F และ 1-G แสดงลักษณะของเจลแป้งที่ให้ความร้อนที่ 100°C ระยะเวลาต่างๆ กัน พบว่าการให้ความร้อนเพียง 5 นาทีก็สามารถทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้มาก โดยจะเห็นชั้นส่วนของเม็ดแป้งซ้อนกันเป็นชั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 60 นาที จะเห็นได้ว่าเม็ดแป้งที่ 100°C ระยะเวลา 5 นาทีเกิดการพองตัวได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินเซชันของแป้งพุทธรักษาอยู่ในช่วง 68-69°C [9] ซึ่งการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาตินเซชันมากทำให้โครงสร้างการจัดเรียงตัวภายในเม็ดแป้งถูกทำลายอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแป้งจึงมีการพองตัวได้มาก อย่างไรก็ตามเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งเป็นเวลานานขึ้น (20 และ 60 นาที) ลักษณะเจลแป้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C ร่วมกับการให้ความร้อน พบว่าเม็ดแป้งมีการพองตัวและแตกตัวสูงสุด (1-H) สำหรับลักษณะเจลแป้งที่เห็นเป็นวงๆ ซ้อนกัน ซึ่งจะเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อแป้งพองตัวมากขึ้นนั้น แสดงถึงการจัดเรียงตัวเป็น growth ring โดยมีการเรียงตัวสลับกันระหว่างส่วนที่ไม่มีเลกุลแป้งจับตัวกันอย่างหนาแน่นและส่วนที่ไม่มีเลกุลแป้งจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ นอกจากนี้จากรูปทั้งหมดจะเห็นได้ว่าแป้งที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน เม็ดแป้งยังไม่มีมีการพองตัวบริเวณรอบๆ เม็ดแป้งจะไม่ติดสีไอโอดีน แต่เมื่อให้ความร้อนที่ 80°C เม็ดแป้งมีการพองตัวบางส่วน บริเวณรอบๆ เม็ดแป้งจะติดสีน้ำเงินด้วย แสดงว่ามีการหลุดของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินออกมาจากเม็ดแป้ง เมื่อใช้อุณหภูมิ 100°C และ 121°C ร่วมกับความดันจะเห็นว่าพื้นรอบๆ เม็ดแป้งมีการติดสีไอโอดีนอย่างทั่วถึง แสดงว่าที่สภาวะนี้เม็ดแป้งพองตัวมากและมีการแตกตัวทำให้โมเลกุลแป้งกระจายออกมามากที่สุด ซึ่งลักษณะของเจลแป้งก่อนขึ้นรูปฟิล์มดังกล่าวจะนำมาใช้ในการอธิบายสมบัติทางกลและสมบัติทางเคมีกายภาพของแผ่นฟิล์มต่อไปได้

### 3.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

#### 3.3.1 ลักษณะปรากฏของฟิล์ม

ตัวอย่างแผ่นฟิล์มจากแป้งพุทธรักษาที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อน 80°C นาน 20 นาที และเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน แสดงดังรูปที่ 2 ลักษณะปรากฏของฟิล์มที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C นาน 5, 20 และ 60 นาที มีลักษณะที่คล้ายกันคือใส โปร่งแสง ผิวเรียบทั้งสองด้านไม่มีรอยย่น ด้านที่สัมผัสอากาศจะหยาบและสากด้านที่สัมผัสพลาสติกจะมันและลื่น พบรอยแตกและริ้วเล็กน้อย บริเวณขอบด้านข้างของฟิล์มฟิล์มมีลักษณะเป็นแผ่นที่สมบูรณ์ ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C นาน 5, 20 และ 60 นาที มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 80°C แต่สัมผัสได้ว่าฟิล์มมีความหนาลดลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 80°C และฟิล์มจากเจลแป้งที่ 121°C ภายใต้ความดัน มีลักษณะปรากฏไม่แตกต่างกับที่อุณหภูมิทั้งสองข้างต้น แต่สัมผัสได้ว่าฟิล์มมีความหนาลดลงและพบรอยแตกและริ้วมากขึ้น

#### 3.3.2 ความหนา

ผลการทดสอบความหนาของฟิล์มแสดงในตารางที่ 1 พบว่าที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่ 8°C ทุกช่วงระยะเวลาในการให้ความร้อน ความหนาของแผ่นฟิล์มมีค่าเท่ากันคือ 46  $\mu\text{m}$  ซึ่งอธิบายได้ว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินเซชันของแป้งพุทธรักษาพันธุ์ไทยม่วงมีค่า 69.8-80.0°C และเม็ดแป้งมีขนาดเฉลี่ย 43.7  $\mu\text{m}$  [17] เนื่องจากอุณหภูมิในการให้ความร้อนนี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินเซชัน ซึ่งในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่อุณหภูมินี้เม็ดแป้งมีการพองตัวและแตกตัวในระดับต่ำถึงแม้จะเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนก็ตาม จึงส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่ 100°C พบว่าเมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีความหนาลดลงเป็น 40, 39 และ 37  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่ 80, 100 และ 121°C ร่วมกับการใช้แรงดัน จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งจะส่งผลให้แผ่นฟิล์มมี





**รูปที่ 2** ลักษณะปรากฏของฟิล์มที่เตรียมจากเจลแบ่งที่ผ่านการให้ความร้อน 80°C นาน 20 นาที (A) และที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 121°C ภายใต้ความดัน นาน 20 นาที (B)

ความหนาลดลง เนื่องจากเม็ดแบ่งเกิดการพองตัวและแตกออกได้สมบูรณ์มากขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มลดลง สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Koskinen และคณะ [6] ซึ่งพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิแก่น้ำแบ่งมันฝรั่งเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 121 และ 180°C จะทำให้ฟิล์มมีความหนาลดลงเป็น 86, 72 และ 60  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วน Bengtsson และคณะ [5] พบว่าที่อุณหภูมิ 130°C ใน

การให้ความร้อนแก่น้ำแบ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของเม็ดแบ่งได้สมบูรณ์กว่าที่อุณหภูมิ 100 และ 120°C

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าความหนาของแผ่นฟิล์มแบ่งพุทธรักษาอยู่ในช่วง 35-46  $\mu\text{m}$  ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ทำถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหารซึ่งระบุความหนาไว้ในช่วง 0.010-0.100 มม. (10-100  $\mu\text{m}$ ) [21]

**ตารางที่ 1** ความหนา ( $\mu\text{m}$ ) ของฟิล์มที่เตรียมจากเจลแบ่งพุทธรักษาที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

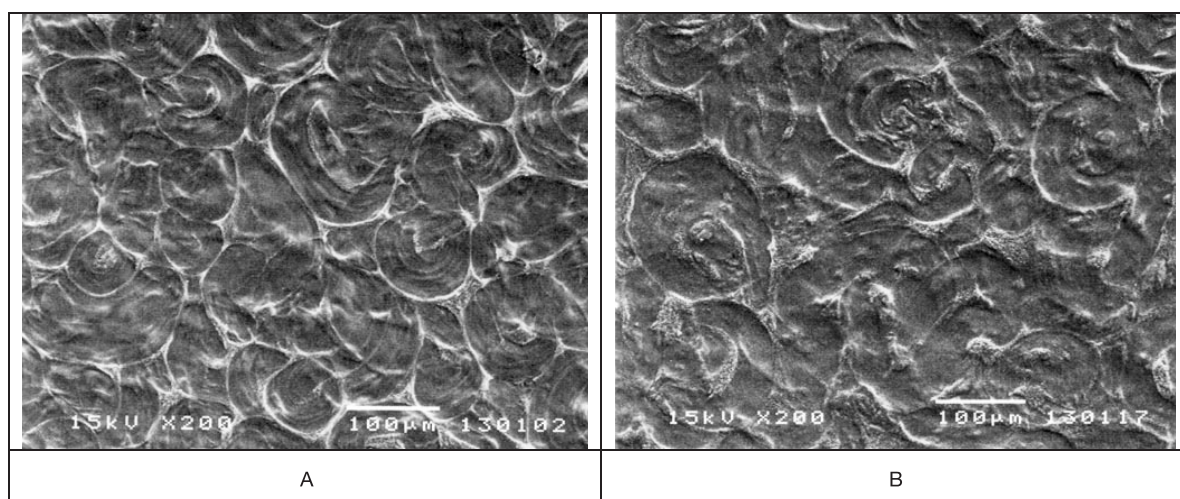
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		
	80	100	121*
5	46±1 $\mu\text{m}$	40±1 $\mu\text{m}$	-
20	46±1 $\mu\text{m}$	39±1 $\mu\text{m}$	35±1 $\mu\text{m}$
60	46±1 $\mu\text{m}$	37±0 $\mu\text{m}$	-

หมายเหตุ \* เป็นการให้ความร้อนแก่น้ำแบ่งที่อุณหภูมิ 80°C นาน 20 นาที แล้วนำน้ำแบ่งที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน

### 3.3.3 ลักษณะพื้นผิวฟิล์ม (Scanning electron microscopy; SEM)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวฟิล์มแบ่งพุทธรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่แตกต่างกันในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งโดยใช้เครื่อง SEM พบว่าทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็ง พื้นผิวฟิล์มโดยรวมมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ ฟิล์มมีลักษณะไม่เรียบและคงเหลือรูปร่างของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมและภายในเม็ดแป้งจะเห็นเป็นลักษณะซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ระดับการการคงรูปของเม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างลักษณะของฟิล์มที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 80°C นาน 5 นาที และที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน ในรูปที่ 3 ที่ 80°C จะยังคงเห็นขอบของเม็ดแป้งอย่างชัดเจนและเม็ดแป้งมีขนาดเล็ก ในขณะที่ 121°C ขอบเม็ดแป้งบาง

ส่วนจะถูกทำลาย บางเม็ดจะเห็นเฉพาะชั้นส่วนภายในที่กระจายออกมาโดยไม่เหลือสภาพของเม็ดแป้ง ซึ่งงานวิจัยของ Thire และคณะ [7] พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งข้าวโพดที่เวลา 5, 20, 50 และ 90 นาที พื้นผิวของแผ่นฟิล์มแป้งมีลักษณะเรียบมากขึ้น โดยเมื่อให้ความร้อนที่ระยะเวลา 5 นาที ฟิล์มยังคงมีลักษณะของเม็ดแป้งที่มีการพองตัว แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้นจนกระทั่งถึง 90 นาที พบว่าลักษณะพื้นผิวฟิล์มเรียบและมีความเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีการแตกตัวของเม็ดแป้งอย่างสมบูรณ์ แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าพื้นผิวฟิล์มของทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งยังคงมีลักษณะของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวหลงเหลืออยู่ แสดงว่าแป้งพุทธรักษาเป็นแป้งที่มีการยึดเกาะกันของโครงสร้างภายในเม็ดแป้งที่มีความแข็งแรงมาก ชั้นส่วนของเม็ดแป้งที่ไม่แตกออกนี้อาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ฟิล์มจากแป้งพุทธรักษามีความแข็งแรงสูง

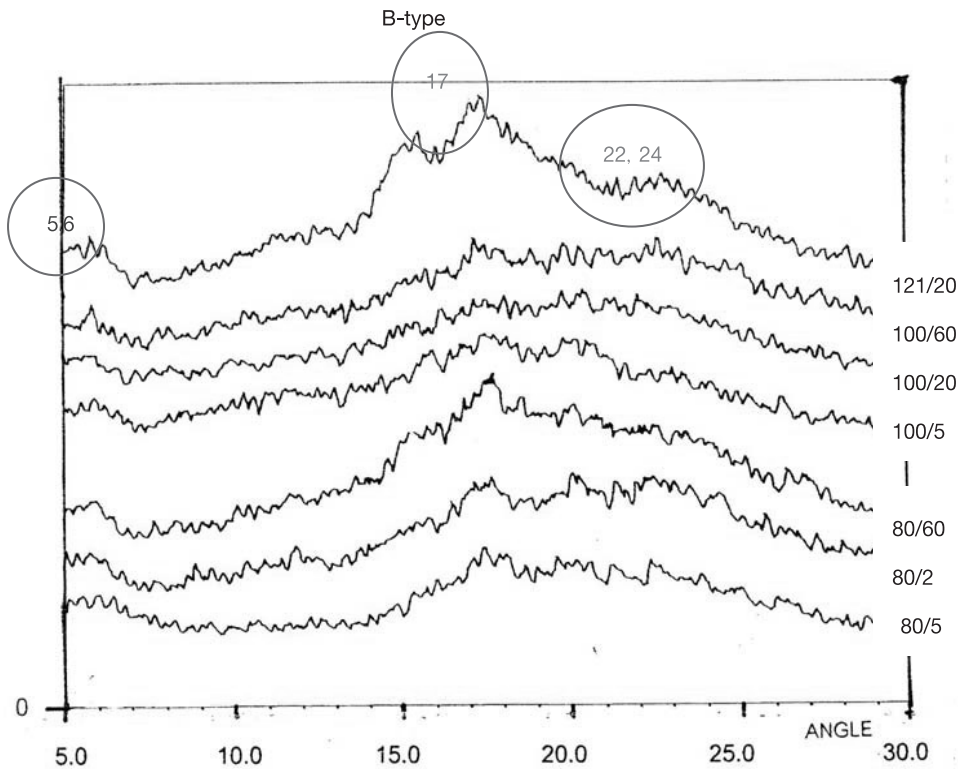


รูปที่ 3 พื้นผิวฟิล์มที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 80°C นาน 5 นาที และที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน

### 3.3.4 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม (X-ray diffraction Patterns)

จากรูปที่ 4 ฟิล์มที่เตรียมจากเจลแบ่งที่อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาต่างๆ และที่ 121°C นาน 20 นาที มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B-type คือ ให้พีคที่ 5.6° และ 17° แต่ไม่มีพีคที่ 18° และพีคคู่ (doublet) ที่ 22° และ 24° โดยฟิล์มจากเจลแบ่งที่ 121°C จะเห็นพีคที่ชัดเจนมากกว่า ความเป็นผลึกของฟิล์มจากเจลแบ่งที่ 121°C นี้เกิดจากการกลับมาสร้างพันธะไฮโดรเจนใหม่ระหว่างโมเลกุลแบ่งที่กระจัดกระจายออกมาทำให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ ในขณะที่ฟิล์มจากเจลแบ่งที่อุณหภูมิ 80°C มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ

B-type เช่นกันแต่ไม่ชัดเจน คาดว่าเป็นโครงสร้างผลึกเดิมที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในเม็ดแบ่งที่ยังไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน ซึ่งแบ่งพุทธรักษาที่มีรายงานว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ B-type [9] ส่วนฟิล์มจากเจลแบ่งที่อุณหภูมิ 100°C ไม่พบลักษณะที่แสดงความเป็นผลึก คาดว่าเกิดจากโครงสร้างผลึกเดิมถูกทำลายไปและมีการสร้างโครงสร้างผลึกใหม่ต่ำเนื่องจากมีโมเลกุลของอะไมโลสที่กระจัดกระจายออกมาน้อย Thire และคณะ [7] เตรียมฟิล์มจากแบ่งข้าวโพดที่ความเข้มข้นแบ่งร้อยละ 5 (w/w) พบว่าในการให้ความร้อนแก่น้ำแบ่งนาน 5 หรือ 90 นาที ฟิล์มที่ได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเหมือนกันคือเป็นแบบ B-type



รูปที่ 4 X-ray diffraction patterns ของฟิล์มแบ่งพุทธรักษาที่เตรียมจากเจลแบ่งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ (อุณหภูมิ/เวลา)

### 3.4 สมบัติทางกลของฟิล์ม

#### 3.4.1 ความต้านทานแรงดึงขาด

ค่าความต้านทานแรงดึงขาด หมายถึงความสามารถของแผ่นฟิล์มที่จะต้านทานแรงดึงซึ่งกระทำที่ปลายข้างหนึ่งของแผ่นทดสอบที่มีความกว้างคงที่จนแผ่นทดสอบนั้นขาด ซึ่งผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 5, 20 และ 60 นาที ค่าความต้านทานแรงดึงขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 43.50 MPa เป็น 45.90 และ 50.93 MPa ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งที่ 100°C พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงขาดไม่แตกต่างกันในทุกช่วงระยะเวลาในการให้ความร้อนซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 49.49-50.96 MPa จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งที่ 80°C เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัวหรือแตกตัวมากขึ้นดังรูปที่ 1 ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอะไมโลสได้ดีขึ้นทำให้ฟิล์มแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น โดย Senti และ Dimler [18] รายงานว่าการผลิตฟิล์มจากแป้งจะอาศัยสมบัติการเกิดรีโทเกรเดชันของอะไมโลส เนื่องจากอะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงไม่มีกิ่งก้านหรือมีกิ่งก้านเพียงเล็กน้อย ทำให้โมเลกุลเชื่อมจับกันอย่างแน่น จากสมบัติดังกล่าวเมื่อมีการกระจายตัวของอะไมโลสมากขึ้นก็จะส่งผลให้มีการจัดเรียงและจับตัวกันของโมเลกุลอะไมโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ดีขึ้นเกิดเป็นฟิล์มที่แข็งแรง

ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดมีค่ามากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งที่ 100°C ทุกระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งมีค่าความต้านทานแรงดึงขาดใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากที่อุณหภูมินี้อะไมโลสมีการกระจายตัวได้ใกล้เคียงกันสังเกตได้จากรูปที่ 1 จึงทำให้การเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงขาด ในส่วนของการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งที่อุณหภูมิ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดันพบว่ามีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 47.56 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 100°C ทั้งนี้อาจเนื่องจากการใช้ความดันร่วมด้วย ซึ่งความดันนี้อาจไปทำลายโมเลกุลของอะไมโลสบางส่วนจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เมื่อนำค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มจากแป้งพุทธรักษาทุกค่าการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกับแผ่นแป้งเหนมเนือง (ทำจากแป้งข้าวเจ้า) พบว่ามีค่าสูงกว่ถึง 10 เท่า จากผลการทดลองที่ได้พบว่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มจากแป้งพุทธรักษาสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของฟิล์มพลาสติกบรรจุอาหารที่กำหนดค่านี้ไว้คือไม่น้อยกว่า 12 MPa [21] เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งพุทธรักษากับฟิล์มชนิดอื่นพบว่าฟิล์มแป้งพุทธรักษามีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม High-amylose corn starch (56.8 MPa) [3] แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง (34.42 MPa) [19] ส่วนฟิล์มจากพลาสติกมีค่าที่ต่างกันอย่างมากขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ (10-175 MPa) [20]

**ตารางที่ 2** ค่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวของฟิล์มที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	สมบัติทางกล	
		ความต้านทานแรงดึงขาด (MPa)	การยืดตัว (ร้อยละ)
80	5	43.50+0.55	8.74+0.46
	20	45.90+1.32	8.90+0.42
	60	50.93+5.19	7.66+0.29
100	5	50.96+0.46	7.39+0.03
	20	50.58+4.60	6.74+0.79
	60	49.49+1.99	6.16+0.38
121*	20	47.56+1.04	5.92+0.10
แผ่นแป้งแทนเนื้อ	-	5.86+1.22	1.20+0.52

หมายเหตุ \* เป็นการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่อุณหภูมิ 80°C นาน 20 นาที แล้วนำน้ำแป้งที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน

### 3.4.2 การยืดตัว

การยืดตัว คือ เปอร์เซ็นต์ของระยะทางที่ฟิล์มยืดออกด้วยแรงดึงจนขาดต่อความยาวเดิม โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของฟิล์มแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าแผ่นฟิล์มแป้งทั้งหมดมีค่าการยืดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 6-9 โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเตรียมเจล ความหนาของแผ่นฟิล์มที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเตรียมเจลสูงขึ้นอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าการยืดตัวลดลง โดยจากรายงานของ ปนัดดา พวงเกษม [19] ซึ่งทดลองลดความหนาของแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (เติมซอร์บิทอลร้อยละ 20) จาก 0.078 มม. เป็น 0.061 มม. และ 0.048 มม. พบว่าค่าการยืดตัวจะลดลงจากร้อยละ 3.09 เป็นร้อยละ 2.83 และร้อยละ 1.28 ตามลำดับ แผ่นแป้งแทนเนื้อมีการยืดตัวเพียงร้อยละ 1.20 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งพุทธรักษา เมื่อเปรียบเทียบค่าการยืดตัวกับฟิล์มจากแป้งอื่นๆ และฟิล์มพลาสติกชนิดต่างๆ พบว่าฟิล์มแป้งพุทธรักษามีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มแป้ง High-amylose corn starch (ร้อยละ 5) [3] และมีค่าการยืดตัวสูงกว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ 1.76) [19] แต่มีค่าต่ำกว่าฟิล์มพลาสติกมาก (ร้อยละ 20-800) [20] ฟิล์มแป้งพุทธรักษาทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งมีค่าการยืดตัวต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ของ

ฟิล์มพลาสติกสำหรับบรรจุอาหารคือร้อยละ 150 [21]

การเพิ่มค่าการยืดตัวของแผ่นฟิล์มส่วนใหญ่มักทำโดยการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เช่น กลีเซอรอลซอร์บิทอล ซึ่งจะไปทำให้แรงยึดระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง โมเลกุลเบี่ยงเคลื่อนได้มากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่การลดความแข็งแรงของพันธะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าต่ำลงตามไปด้วย Ryu และคณะ [3] เตรียมฟิล์มจากแป้ง high-amylose corn ที่ความเข้มข้นแป้งร้อยละ 3 (w/w) พบว่าฟิล์มที่มีการเติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงขาดลดลงจาก 56.8 MPa เป็น 2 MPa และ 6 MPa ส่วนค่าการยืดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 39 ตามลำดับ

## 3.5 สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของฟิล์ม

### 3.5.1 การซึมผ่านก๊าซออกซิเจน

ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มแป้งพุทธรักษาแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าที่อุณหภูมิ 80 °C เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งเป็น 5, 20 และ 60 นาที ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนลดลงคือเท่ากับ 0.294, 0.223 และ 0.036 ซม.<sup>3</sup>·μm/m<sup>2</sup>·d·

kPa ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งเป็น 5, 20 และ 60 นาที พิล์มมีค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนลดลงคือเท่ากับ 0.294, 0.223 และ 0.036  $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$  ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 100 °C เมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลงเช่นกันคือเท่ากับ 0.211, 0.204 และ 0.030  $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$  ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 20 นาที แล้วนำน้ำแข็งที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน พบว่ามีค่าต่ำที่สุดคือเท่ากับ 0.021  $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$  โดยทั้งหมดนี้อาจอธิบายได้จากการกระจายตัวของเม็ดแข็ง เมื่อเม็ดแข็งมีการพองตัวและแตกออกมากขึ้นจะทำให้โมเลกุลแข็งมีการกระจายออกมา เนื่องจากโมเลกุลแข็งประกอบด้วยหน่วยกลูโคสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในแต่ละหน่วย 3 หมู่ ดังนั้นเมื่อโมเลกุลแข็งมีการกระจายมากขึ้นจึงทำให้สภาพความเป็นไฮโดรฟิลิกของแผ่นฟิล์มมากขึ้น จึงอาจเป็นสาเหตุให้ก๊าซออกซิเจนผ่านแผ่นฟิล์มได้น้อยลง เมื่อนำค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนเปรียบเทียบกับฟิล์มอื่นๆ พบว่าฟิล์มแข็งพหุวัตรกษามีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง (0.089  $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ ) [19] แต่มีค่าต่ำ

กว่าฟิล์มจากโพลีเอทิลีนมาก (427-1900  $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ ) [22-23] และมีค่าต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งหรือพอลิแซคคาไรด์อื่นๆ ที่มีการเติมสารพลาสติไซเซอร์ เนื่องจากการเติมสารพลาสติไซเซอร์ลงไปทำให้สายพอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวได้ดี ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นจึงน่าจะทำให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่านฟิล์มได้มากขึ้นด้วย ผลการวิจัยของ Arvanitoyannis และคณะ [24] พบว่าฟิล์มที่มีความเป็นผลึกสูงจะทำให้การซึมผ่านของก๊าซ (ออกซิเจน ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์) ลดลง

### 3.5.2 การซึมผ่านไอน้ำ

ผลการทดสอบสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแข็งพหุวัตรกษาแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าฟิล์มแข็งพหุวัตรกษามีค่าการซึมผ่านไอน้ำอยู่ในช่วง 0.4-0.6  $\text{g} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$  เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอื่นๆ พบว่าที่ค่าต่ำกว่าฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง (3.6  $\text{g} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ ) [19] และฟิล์มจากอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์ (103-124  $\text{g} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ ) [25] แต่สูงกว่าฟิล์มจากพอลิเอทิลีน (0.02-0.08  $\text{g} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ ) [22-23]

**ตารางที่ 3** การซึมผ่านก๊าซออกซิเจนและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่เตรียมจากเจลแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	การซึมผ่านก๊าซออกซิเจน ( $\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ )	การซึมผ่านของไอน้ำ ( $\text{g} \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa}$ )
80	5	0.294	0.600
	20	0.223	0.532
	60	0.036	0.543
100	5	0.211	0.457
	20	0.204	0.455
	60	0.030	0.400
121*	20	0.021	0.444

หมายเหตุ\* เป็นการให้ความร้อนแก่น้ำแข็งที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 20 นาที แล้วนำน้ำแข็งที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C นาน 20 นาที ภายใต้ความดัน

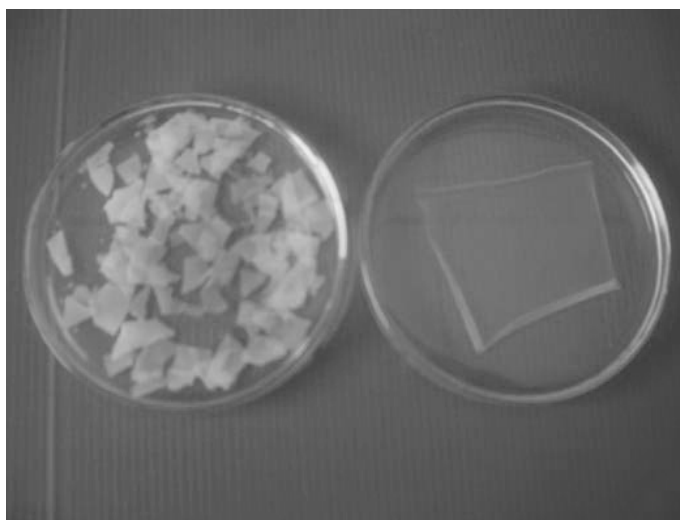
### 3.5.3 การละลายของฟิล์มในน้ำ

การละลายในน้ำของฟิล์มแป้งพุดรั๊กษาทุกอุณหภูมิและทุกระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงร้อยละ 0.66-1.15 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแผ่นแป้งเหนมเนื่องเล็กน้อย (ร้อยละ1.30) แต่จากการสังเกตขณะทดลองพบว่าเมื่อนำแผ่นฟิล์มออกจากเครื่อง shaking incubator แผ่นฟิล์มของแป้งพุดรั๊กษายังคงความเป็นแผ่นอย่างสมบูรณ์ แต่สำหรับแผ่นแป้งเหนมเนื่องพบว่าแผ่นแป้งจะยุ่ยคล้ายกระดาษทิชชูเช่นที่แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการละลายของฟิล์มจาก high amylose corn starch ผสมคอร์นิบออลร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าการละลายเท่ากับร้อยละ 11.4 [3] พบว่าฟิล์มจากแป้งพุดรั๊กษามีค่าการละลายที่ต่ำกว่าค่อนข้างมาก

## 4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์สมบัติของแผ่นฟิล์มแป้งพุดรั๊กษาสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแผ่นฟิล์มมากกว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้ง ซึ่งสมบัติของแผ่นฟิล์มแป้งพุดรั๊กษาส่วนใหญ่จะคล้ายกับฟิล์มพลาสติก และมีแนวโน้มว่าสามารถนำไปใช้สำหรับบรรจุอาหารได้ ยกเว้นบางค่าที่ต้องทำการปรับปรุงและทำการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เช่น ค่าการยึดตัวซึ่งมีค่าต่ำมาก เป็นต้น ในการเลือกที่จะใช้สภาวะใดที่เหมาะสมในการเตรียม

ฟิล์มจะขึ้นอยู่กับก็นำฟิล์มไปใช้ประโยชน์ เช่นหากต้องการนำฟิล์มไปใช้บรรจุอาหาร ควรเลือกการเตรียมฟิล์มที่อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่ 100°C นาน 5 นาที เนื่องจากอุณหภูมินี้เม็ดแป้งมีการแตกตัวเกิดการกระจายตัวของอะไมโลสได้ดี สมบัติของฟิล์มอยู่ในเกณฑ์ที่ดีสามารถใช้บรรจุอาหารได้ ยกเว้นบางค่าที่ควรปรับปรุงคือ ค่าการยึดตัวซึ่งหากต้องการให้ฟิล์มมีค่าการยึดตัว เพิ่มขึ้นอาจทำการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไปในกระบวนการเตรียมฟิล์มแต่อาจทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดลดลง และควรทำการทดสอบบางค่าเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด เช่น ค่าความคงทนต่อการพับ เป็นต้น จากการทดสอบสมบัติของแผ่นแป้งเหนมเนื่องพบว่ามีความต้านทานแรงดึงขาดที่ต่ำและเมื่อสัมผัสกับน้ำแผ่นแป้งขาดยุ่ยได้ง่ายซึ่งถ้าหากเพิ่มสมบัติค่าความต้านทานแรงดึงขาดให้สูงขึ้นและค่าการละลายในน้ำของแผ่นฟิล์มให้น้อยลงก็อาจจะทำให้แผ่นเหนมเนื่องมีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่งฟิล์มจากแป้งพุดรั๊กษากินได้มีสมบัติของค่าทั้งสองดังกล่าวที่ดีคือ มีค่าความต้านทานแรงดึงขาดที่สูงและเมื่อนำแผ่นฟิล์มไปละลายน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้ยังคงความเป็นแผ่นไม่ขาดยุ่ย ดังนั้นในการผลิตแผ่นแป้งเหนมเนื่องจึงนำทำการทดลองผสมแป้งพุดรั๊กษากินได้ลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติของแผ่นแป้งเหนมเนื่องให้ดีขึ้นและน่ารับประทานมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5 การละลายในน้ำของแผ่นฟิล์มแป้งพุดรั๊กษา (ขวา) และแผ่นแป้งเหนมเนื่อง (ซ้าย)

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Hizukuri, S., 1985, "Relationship between the Distribution of the Chain Length of Amylopectin and the Crystalline Structure of Starch Granules", *Carbohydrate Research*, Vol. 141, pp. 295-306.

2. Rindlav, A., Hulleman, S.H.D., and Gatenbolm, P., 1997, "Formation of Starch Films with Varying Crystallinity", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 34, pp. 25-30.

3. Ryu, S.Y., Rhim, J.W., Roh, H.J., and Kim, S.S., 2002, "Preparation and Physical Properties of Zein-coated High-amylose Corn Starch Film", *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.* Vol. 35, pp. 680-686.

4. Mali, S., Grossmann, M.V.E., Garcia, M.A., and Martino, M.N., 2002, "Microstrutural Characterization of Yam Starch Films", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 50, pp. 379-386.

5. Bengtsson, M., Koch, K., and Gatenholm, P., 2003, "Surface Octanoylation of High-amylose Potato Starch Films", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 54, pp. 1-11.

6. Koskinen, M., Suortti, T., Autio, K., Myllarinen, P., and Poutanen, K., 1996, "Effect of Pretreatment on the Film Forming Properties of Potato and Barley Starch Dispersions", *Industrial Crops and Products*, Vol. 5, pp. 23-34.

7. Thire, R.M.S.M., Simao, R.A. and Andrade, C.T., 2003 "High Resolution Imaging of the Microstructure of Maize Starch Films", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 54, pp. 149-158.

8. รัชดา ทนวิฑูว์ตร, 2537, *อิทธิพลของพันธุ์ วันปลูก อัตราปุ๋ย และอัตราปลูก ต่อผลผลิตและลักษณะทางการเกษตรบางประการของพุทธรักษากินได้ (Canna edulis Ker.)* มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย กรุงเทพฯ

292 หน้า.

9. Thitipraphunkul, K., Uttapap, D., Piyachomkwan, K., and Takeda, Y., 2003, "A Comparative Study of Edible Canna (*Canna edulis*) Starch from Different Cultivars. Part I. Chemical Composition and Physicochemical Properties", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 53, pp. 317-324.

10. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 1990, *Official Methods of Analysis* (15<sup>th</sup> ed.), Virginia: The Association of Official Analytical Chemists.

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

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. ASTM, 1989, *Standard Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting (E 882-88)*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

14. ASTM, 1989, *Standard Methods for Oxygen Gas Transmission Rate through Plastic Film and Sheeting using a Coulometric Sensor (D 3985-81)*, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

15. ASTM, 1987, *Standard Methods for Water Vapor Transmission of Materials (E 96-80)*, Annual book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

16. Gontard, N., Guilbert, S., and Cuq, J.L., 1992, "Edible Wheat Gluten Films: Influence of the Main Process Variables on Film Properties using Response Surface Methodology", *Journal of Food Science*, Vol. 57, pp. 190-195.



17. วัชรินทร์ จันทร์สุวรรณ, 2544, *การศึกษาคุณลักษณะของแป้งที่แยกได้จากเหง้าพุทธรักษากินได้ (Canna edulis)*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
18. Senti, F.R. and Dimler, R.J., 1959, "High-amylose Corn-properties and Prospects", *Food Technology*, Vol. 63, pp. 663-667.
19. ปณิตดา พวงเกษม, 2540, *การเตรียมฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันสำปะหลังและแนวทางการใช้ประโยชน์*, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
20. Briston, J.H., 1988. *Plastic Films* (3<sup>rd</sup> ed.), Wiley, New York.
21. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2534, *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร (มอก.1027-2534)*.
22. Greener, L.K., 1992, *Physical Properties of Edible Films and their Components*, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison.
23. McHugh, T.H. and Krochta, J.M., 1994, *Permeability Properties of Edible Films in J.M. Krochta et al. (Eds.), Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*, Lancaster: Technomic Publishing Company, pp. 139-187.
24. Arvanitoyannis, I., Nakayama, A., and Aiba, S., 1998, "Edible Films Make from Hydroxypropyl Starch and Gelatin and Plasticized by Polyols and Water", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 36, pp. 105-119.
25. Rindlav-Westling, A., Stading, M., Hermansson A.M., and Gatenholm, P., 1998, "Structure, Mechanical and Barrier Properties of Amylose and Amylopectin Films", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 36, pp. 217-224.