



วิทยานิพนธ์

อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์
ทรินผสมต่อสมบัติของแคปซูลและฟิล์มบริโภคนำได้

**INFLUENCE OF HYDROXYPROPYL CASSAVA STARCH, AGAR
AND MALTODEXTRIN BLENDS ON PROPERTIES OF EDIBLE
CAPSULES AND FILMS**

นางสาวพรรณวิภา วงษ์พันธุ์

1943

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา ๒๕๖๒

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

สาขาวิชา เทคโนโลยีการบรรจุ

ภาควิชา เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

เรื่อง อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินผสมต่อสมบัติของแคปซูลและฟิล์มบริโอคได้

Influence of Hydroxypropyl Cassava Starch, Agar and Maltodextrin Blends on Properties of Edible Capsules and Films

นามผู้วิจัย นางสาวพรรณวิภา วงษ์พันธุ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐดนัย หาญการสุจริต, ปร.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อำพร เสน่ห์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อำพร เสน่ห์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินผสมต่อสมบัติของ
แคปซูลและฟิล์มบริโภคน้ำได้

Influence of Hydroxypropyl Cassava Starch, Agar and Maltodextrin Blends on Properties of
Edible Capsules and Films

โดย

นางสาวพรรณวิภา วงษ์พันธุ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
ปีการศึกษา 2562

พรรณวิภา วงษ์พันธุ์ : อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินผสมต่อสมบัติของแคปซูลและฟิล์มบริโกลได้ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐนัย หาญการสุจริต, ประ.ด. ปีการศึกษา 2562

เปลือกแคปซูลเป็นบรรจุภัณฑ์บริโกลได้ที่ใช้เพื่อขนส่งยาเข้าสู่ร่างกาย สภาพการละลายและพฤติกรรมของการปลดปล่อยเป็นสมบัติสำคัญในการปลดปล่อยยาแบบควบคุมตำแหน่งหรือแบบกำหนดเป้าหมาย เปลือกแคปซูลส่วนใหญ่ผลิตจากเจลาตินที่มาจากสัตว์ ซึ่งเป็นปัญหาสำหรับผู้บริโภคบางกลุ่ม เช่น ชาวมุสลิมและผู้บริโภคมังสวิรัต การพัฒนาเปลือกแคปซูลจากพืชจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติวัสดุบรรจุบริโกลได้และพัฒนาเปลือกแคปซูลสำหรับควบคุมการละลายและปลดปล่อยยา โดยใช้สตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิลผสมสตาร์ชข้าวโดยเติมอาการ์ร้อยละ 10-30 และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20-60 โดยขึ้นรูปเปลือกแคปซูลด้วยวิธีจุ่มด้วยแม่พิมพ์และขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยวิธีหล่อสารละลาย จากการทดลองพบว่า อาการ์เป็นองค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการขึ้นรูป เนื่องจากมีพฤติกรรมเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน เนื่องจากอาการ์มีโครงสร้างที่แข็งแรงจึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอาการ์แข็งแรง การเติมอาการ์ทำให้สภาพการละลายลดลง ในทางตรงกันข้ามมอลโทเดกซ์ทรินทำหน้าที่เป็นสารเติมทำให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง เนื่องจากปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เพิ่มขึ้น สภาพการซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น การเพิ่มมอลโทเดกซ์ทรินทำให้สภาพการละลายของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ทั้งนี้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปเปลือกแคปซูลแปรผันตรงกับปริมาณอาการ์และแปรผกผันกับปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน นอกจากนี้การผันแปรสัดส่วนระหว่างสตาร์ชอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินช่วยควบคุมการละลายในสภาวะกรดซึ่งจำลองสภาวะกระเพาะอาหาร ในขณะที่การเคลือบสารควบคุมการปลดปล่อยทางการค้า หรือ Eudragit® บนผิวแคปซูลที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการปลดปล่อยยาในสภาวะเป้าหมายได้ ดังนั้นการผันแปรสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินมีประสิทธิภาพในการผลิตบรรจุภัณฑ์บริโกลได้และเปลือกแคปซูลที่สามารถควบคุมการละลายและปลดปล่อยยาตรงตามเป้าหมาย

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Phanwipa Wongphan : Influence of Hydroxypropyl Cassava Starch, Agar and Maltodextrin Blends on Properties of Edible Capsules and Films. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Nathdanai Harnkarnsujarit, Ph.D. Academic Year 2019

Capsule shells are edible packing materials used for drug delivery. Solubility and release behavior are major properties for control- or target-release properties. Typical capsule materials made from animal derived gelatin causing problems for some groups of consumers such as Muslim and vegetarian. Therefore, plant-based capsules can be alternative materials for these consumers. The objectives were to develop edible packaging and capsule shells to control solubility and hence drug release. Different ratios of hydroxypropyl cassava starch and rice starch blends, agar (10% to 30%) and maltodextrin (20% to 60%) were prepared for capsule shells (mold dipping) and films (solution casting). Results showed that agar improved capsule formation due to gelation at low temperature. Moreover, agar improved mechanical strength and water barrier property due to rigid network and strong interaction between starch and agar. Addition of agar decreased solubility that was insignificantly impacted by increasing agar concentration (10% to 30%). Conversely, maltodextrin acted as fillers that reduced mechanical strength due to plasticization, increasing molecular mobility and increased permeability. Solubility increased linearly with increasing maltodextrin concentration but reduced capsule formability. The proportional between the starch, agar and maltodextrin effectively controlled dissolution in acid, representing stomach condition. Moreover, coating of commercial control-release agents or Eudragit® effectively controlled the release of paracetamol at target condition. Accordingly, modifying ratios between starch, agar and maltodextrin effectively produced edible packaging and developed capsule shells for control solubility and target drug release.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____/____/____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับคำสั่งสอน คำแนะนำ กำลังใจ และแนวทางการทำงานรวมทั้งการแก้ไขปัญหาอย่างมีระบบ รอบคอบ จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐคนัย หาญการสุจริต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำพร เสน่ห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม มาโดยตลอด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งต่ออาจารย์เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้มอบความรู้อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการนำมาปรับใช้กับวิทยานิพนธ์เล่มนี้และในอนาคต

ขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด รวมถึงรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ทั้งภายในและภายนอกคณะอุตสาหกรรมเกษตร ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมด ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย

พรรณวิภา วงษ์พันธุ์

1943

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
สารบัญตารางผนวก.....	ฎ
สารบัญภาพผนวก.....	ฐ
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
การตรวจเอกสาร	4
1. ฟิล์มบริโกลได้และการเคลือบ	4
2. สตาร์ช.....	5
3. สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล	8
4. อาการ์.....	9
5. มอลโทเดกซ์ทริน.....	10
6. แคปซูล	10
7. การละลายของยา	11
8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตฟิล์มบริโกลได้และเปลือกแคปซูล	12
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์.....	20

วิธีการ	22
1. การเตรียมสารละลายและการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีหล่อสารละลาย (solution casting)	22
2. การวิเคราะห์สมบัติของสารแขวนลอย	22
3. การวิเคราะห์สมบัติฟิล์ม	23
4. การขึ้นรูปเปลือกแคปซูล	26
5. การวิเคราะห์การปลดปล่อยยาและการเคลือบผิวเปลือกแคปซูล	26
6. การเตรียมฟิล์มสตาร์ชผสมด้วยวิธีการอัดรีด (extrusion)	28
7. การวิเคราะห์ทางสถิติ	29
ผลและวิจารณ์	30
1. วิทยากระแสนของสารแขวนลอย	30
2. สันฐานวิทยาและคุณสมบัติฟิล์ม	33
3. เปลือกแคปซูล	52
4. การผลิตฟิล์มบริโกลได้ด้วยกระบวนการอัดรีด	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	63
ภาคผนวก	69
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	77

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของแอมิโลสและอะไมโลเพกตินในพืชชนิดต่าง ๆ.....	6
ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน	23
ตารางที่ 3 ร้อยละโดยน้ำหนักของสารเคมีสำหรับเตรียมสารเคลือบ Eugragit L100, S100 และ L100-55.....	27
ตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนของปริมาณของแข็งในการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการอัดรีด	29
ตารางที่ 5 แสดงอุณหภูมิจากบารลดจนถึงหน้าแม่พิมพ์และความเร็วของสกรู.....	29

1943

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 การจำแนกพอลิแซ็กคาไรด์ตามแหล่งที่มา.....	5
ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชันของสตาร์ช	8
ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของอาหาร	9
ภาพที่ 4 फिल्मอาหาร (A) และ फिल्मอาหารดัดแปรด้วยอัลคาไลด์ फिल्मอาหารและ फिल्मอาหารดัดแปรด้วยอัลคาไลด์ (B).....	14
ภาพที่ 5 เปลือกแคปซูลจากสารแขวนลอยไฮดรอกซีโพรพิล เมทิลเซลลูโลสผสมสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล ก) 100:0 ข) 70:30 ค) 50:50 ง) 30:70 และ จ) 0:100	15
ภาพที่ 6 เปลือกแคปซูลจากสารแขวนลอยเจลาติน สตาร์ชข้าวโพดไฮดรอกซีโพรพิลที่ความเข้มข้นต่างกัน ก) 100:0 ข) 90:10 ค) 80:20 ง) 70:30 จ) 60:40 และ ฉ) 50:50	16
ภาพที่ 7 การพองของเปลือกแคปซูลซึ่งใช้พลาสติกไซเซอร์ต่างชนิดกัน	17
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติวิทยากระแสนของสารแขวนลอยสตาร์ช (S) อาหาร (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ผสมโดยมีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย (ก) (ข) คือ มอดุลัสสะสม และ (ค) (ง) คือ มุมเฟส ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ และลดอุณหภูมิ.....	32
ภาพที่ 9 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของ (ก) พื้นผิว และ (ข) ภาคตัดขวาง (cross section) ของ फिल्मโดยมีอัตราส่วนของสตาร์ช (S) อาหาร (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ที่แตกต่างกัน	35
ภาพที่ 10 สมบัติเชิงกลพลวัตที่ความถี่ คือ 0.5, 1 และ 5 เฮิร์ตซ์ของ फिल्मสตาร์ชที่มีการเติมอาหารและมอลโทเดกซ์ทรินในอัตราส่วนที่ต่างกัน (ก) $\tan \delta$ ของ फिल्मสตาร์ชที่เติมอาหารร้อยละ 10 ถึง 30 (ข) $\tan \delta$ ของ फिल्मสตาร์ชที่เติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 ถึง 60 โดยมีอาหารอยู่ร้อยละ 20 (ค) และ (ง) อุณหภูมิในการคลายตัวของวัสดุ (relaxation temperature) เมื่อมีการเติมอาหารและมอลโทเดกซ์ทริน ตามลำดับ.....	38
ภาพที่ 11 สเตปคูลัมอินฟราเรดของ फिल्मสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาหารและมอลโทเดกซ์ทรินแตกต่างกัน ได้แก่ อาหารร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาหารร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาหารร้อยละ 20.....	41

ภาพที่ 12 สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (tensile strength, TS) การดึงยืด (elongation at break, EB) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus, YM) ของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาการ์ และมอลโทเดกซ์ทรินแตกต่างกัน ได้แก่ อาการ์ร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาการ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมี อาการ์ร้อยละ 20	44
ภาพที่ 13 สมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (barrier property) ประกอบด้วย ประกอบด้วยค่าสภาพให้ ซึมผ่านไอน้ำ (water vapor permeability, WVP) ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (oxygen permeability, OP) และค่ามุมสัมผัสน้ำ (water contact angle, CA) ของฟิล์มสตาร์ชที่มี สัดส่วนของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินแตกต่างกัน ได้แก่ อาการ์ร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาการ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาการ์ร้อยละ 20	47
ภาพที่ 14 การส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน (300-800 nm) โดยมีปริมาณอาการ์ร้อยละ 0- 30 และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 0-60	48
ภาพที่ 15 สภาพการละลายน้ำและกรด (HCl, pH=1) ของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาการ์ (ก) และมอลโทเดกซ์ทริน (ข) แตกต่างกัน ได้แก่ อาการ์ร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาการ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาการ์ร้อยละ 20 เมื่อเวลาแตกต่างกัน	50
ภาพที่ 16 สภาพการละลายของฟิล์มในน้ำและกรด (HCl, pH=1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความ เข้มข้นของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินและร้อยละการละลายเมื่อเวลาแตกต่างกัน	51
ภาพที่ 17 ลักษณะปรากฏของเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และ มอล โทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกันโดยวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์	54
ภาพที่ 18 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของภาคตัดขวาง (cross section) ของเปลือกแคปซูลโดยมี อัตราส่วนของสตาร์ช (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ที่แตกต่างกัน	55
ภาพที่ 19 การปลดปล่อยยาพาราเซตามอลบรรจุในเปลือกแคปซูลที่มีการเคลือบด้วย Eudragit [®] S100, Eudragit [®] L100-55, และ Eudragit [®] L100 เป็นระยะเวลารวมในการปลดปล่อยของสาร คือ 2, 4 และ 7 ชั่วโมง ซึ่งแสดงถึงการละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl pH=1) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffer pH=6.8) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารละลาย บัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffer pH=7.4) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	58

ภาพที่ 20 ความสามารถในการขึ้นรูปของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูผ่านแม่พิมพ์แบบช่อง60

ภาพที่ 21 อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินต่อสมบัติของสารแขวนลอย फिल्मบริ โภคได้และเปลือกแคปซูล60



สารบัญตารางผนวก

หน้า

ตารางผนวกที่ 1 ความหนาของเปลือกแคปซูลขนาดแข็ง (n=15).....	70
ตารางผนวกที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติของเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์ และมอลโทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกัน โดยวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์และเปลือกแคปซูลชนิดแข็งที่นิยมใช้ในเชิงการค้าซึ่งผลิตมาจากเจลาติน.....	71
ตารางผนวกที่ 3 เครื่องมือทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด.....	72
ตารางผนวกที่ 4 สมบัติเชิงกล สภาพซึมผ่านไอน้ำ สภาพซึมผ่านไอน้ำของแก๊สออกซิเจนและค่ามุมสัมผัสของฟิล์มสตาร์ชมันสาปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่อัตราส่วนต่างกัน.....	73

สารบัญภาพผนวก

หน้า

ภาพผนวกที่ 1 ความหนืดของสารแขวนลอยทดสอบด้วยเครื่อง Brookfield digital viscometer (Model LVE DV-II+ with spindle 2H).....	70
ภาพผนวกที่ 2 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของ (ก) พื้นผิว และ (ข) ภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์ม โดยมีอัตราส่วนของสตาร์ซ (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ที่แตกต่างกัน.....	74
ภาพผนวกที่ 3 สเปกตรัมอินฟราเรดของฟิล์มสตาร์ซที่มีสัดส่วนของอาการ์และมอลโทเดกซ์- ทรินแตกต่างกัน.....	75
ภาพผนวกที่ 4 ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มสตาร์ซที่มีสัดส่วนของอาการ์และมอลโทเดกซ์- ทรินแตกต่างกัน.....	76
ภาพผนวกที่ 5 การส่องผ่านของแสงที่ความยาว 200-800 nm โดยมีปริมาณอาการ์ และมอลโท- เดกซ์ทรินที่ต่างกัน.....	76

อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินผสมต่อ
สมบัติของแคปซูลและฟิล์มบริโกลได้

**Influence of Hydroxypropyl Cassava Starch, Agar and Maltodextrin Blends on
Properties of Edible Capsules and Films**

คำนำ

ฟิล์มบริโกลได้และการเคลือบเป็นที่สนใจของนักวิจัยและอุตสาหกรรมอาหารและยา ซึ่งฟิล์มบริโกลได้และการเคลือบนั้นให้ประโยชน์กับผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยมีหน้าที่หลัก คือ การป้องกันสินค้าภายในบรรจุภัณฑ์ต่อความเสียหายจากการสัมผัสกับปัจจัยที่เร่งให้เกิดการเสื่อมเสียในสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการขนส่งสารอาหาร ยา และอาหารเสริมเข้าสู่ร่างกายในรูปฟิล์มและการขึ้นรูปเป็นเปลือกแคปซูลยา

แคปซูลเป็นวัสดุบรรจุที่ใช้สำหรับการขนส่งยาและผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเข้าสู่ร่างกาย โดยปกป้องไม่ให้ยาหรือสารที่บรรจุอยู่ภายในสัมผัสโดยตรงกับช่องปากของผู้บริโภค เนื่องจากรสชาติและกลิ่นรสของยาที่ไม่พึงประสงค์ หรืออาจมีการควบคุมให้มีการปลดปล่อยยาให้เหมาะสมกับการดูดซึมหรือการรักษาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย ทั้งนี้การกำกับการละลายของวัสดุอาจเป็นแนวทางควบคุมการปลดปล่อยยาที่ตำแหน่งเป้าหมายในร่างกาย วัสดุที่นิยมใช้ในการผลิตเปลือกแคปซูล ได้แก่ เจลาติน (gelatin) โดยมีทั้งเปลือกแคปซูลชนิดแข็ง (hard capsule) สำหรับบรรจุยาหรืออาหารเสริมชนิดผง และเปลือกแคปซูลชนิดนิ่ม (soft capsule) ที่ใช้บรรจุผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยเฉพาะน้ำมัน

สถานการณ์ของมันสำปะหลังของประเทศไทยในปี 2562 ถึง 2563 พบว่า ผลผลิตของมันสำปะหลังมีมากถึง 28,753,891 ตัน (สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย, 2562) ทำให้แป้งมันสำปะหลังในประเทศไทยมีราคาถูก อุตสาหกรรมจึงให้ความสำคัญกับการนำผลผลิตมันสำปะหลังมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าซึ่งในทางบรรจุภัณฑ์ได้นำแป้งมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์ม อย่างไรก็ตามประเทศไทยมีความคงตัวและคุณสมบัติเชิงกลต่ำ จึงมีการ

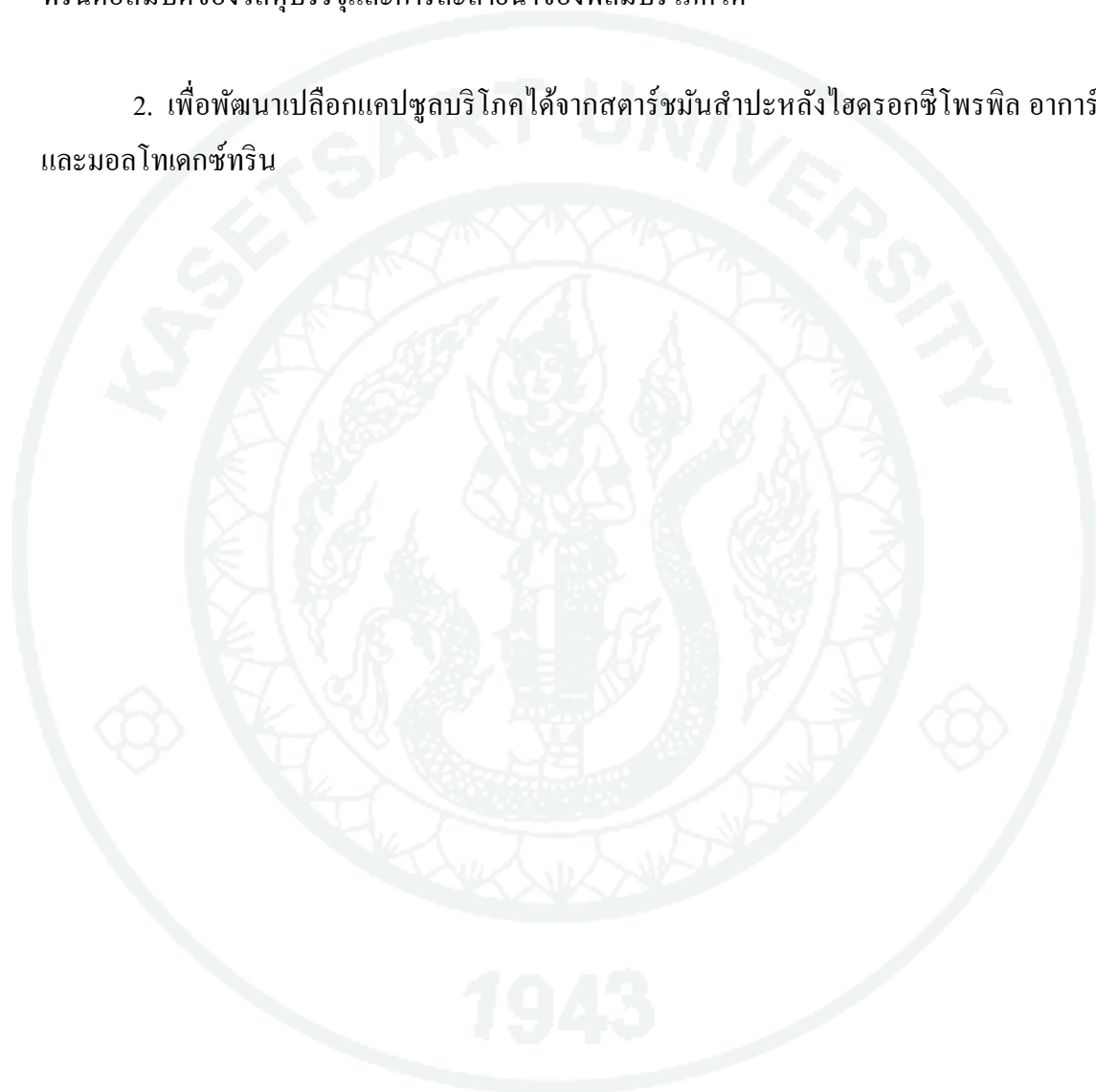
ดัดแปรแป้งเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้น สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล (hydroxypropyl starch) เป็นโครงสร้างของสตาร์ช ดัดแปรเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตและสมบัติของฟิล์ม

พอลิแซ็กคาไรด์เป็นวัตถุดิบในการเตรียมบรรจุภัณฑ์อาหารเนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และการขึ้นรูปฟิล์มที่ดี อาการ์ (agar) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์มีการขึ้นรูปฟิล์มที่ดีและความแข็งแรงเชิงกลในขณะที่มีข้อเสีย เช่น ความแข็งเปราะ ละลายน้ำน้อยและต้นทุนการผลิตสูง ในขณะที่มอลโทเดกซ์ทรินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้กับอาหารหลายประเภท อย่างไรก็ตามมอลโทเดกซ์ทรินสามารถทำงานร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ รวมถึงความสามารถในการละลายและการตกผลึกซ้ำของฟิล์ม การผสมสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์ และมอลโทเดกซ์ทรินจึงเป็นแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพการขึ้นรูป และคุณสมบัติของวัสดุรวมถึงการละลาย สำหรับการผลิต ฟิล์มบริโกลได้ สารเคลือบและเปลือกแคปซูลเพื่อควบคุมการปลดปล่อย

การขึ้นรูปฟิล์มด้วยการหล่อสารละลาย (solution casting) การอัดรีด (extrusion) และการเป่า (blowing) มีกระบวนการ วัตถุดิบ และข้อเสียที่แตกต่างกัน และอาจส่งผลให้คุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ การวิจัยฟิล์มบริโกลได้ส่วนใหญ่อาศัยกระบวนการหล่อสารละลาย ซึ่งต้องนำวัสดุที่ผ่านการผสมไปขึ้นรูปโดยทำการระเหยเพื่อกำจัดตัวทำละลาย ในขณะที่การผลิตฟิล์มด้วยกระบวนการอัดรีดมีความเป็นไปได้ในระดับอุตสาหกรรมมากกว่า เนื่องจากไม่ใช้ตัวทำละลาย ผลิตได้อย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก สำหรับการผลิตเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจะใช้การเตรียมวัตถุดิบเช่นเดียวกับการหล่อสารละลายแล้วนำไปผ่านกระบวนการจุ่มด้วยแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดการเคลือบผิวและเกิดเปลือกแคปซูลที่มีรูปทรงเดียวกับแม่พิมพ์ การผลิตเปลือกแคปซูลชนิดนี้จะมีวิธีขึ้นรูปฟิล์มก่อนแล้วบรรจุ และปิดผนึกด้วยความร้อน วัสดุที่นำเข้าสู่กระบวนการจึงมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปมาแล้ว การขึ้นรูปฟิล์มบริโกลได้ด้วยกระบวนการอัดรีดจึงเป็นแนวทางส่งเสริมการใช้ฟิล์มบริโกลได้ในระดับอุตสาหกรรมสำหรับผลิตเปลือกแคปซูลชนิดนี้ โดยองค์ประกอบของวัตถุดิบจะมีผลต่อประสิทธิภาพการขึ้นรูปและคุณสมบัติของวัสดุบรรจุ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชข้าว อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินผสม รวมถึงกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อสารละลายและการอัดรีด ที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลได้ และการขึ้นรูปเปลือกแคปซูล

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสสารไขมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์-ทรินต่อสมบัติของวัสดุบรรจุและการละลายน้ำของฟิล์มบริโอคได้
2. เพื่อพัฒนาเปลือกแคปซูลบริโอคได้จากสสารไขมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน



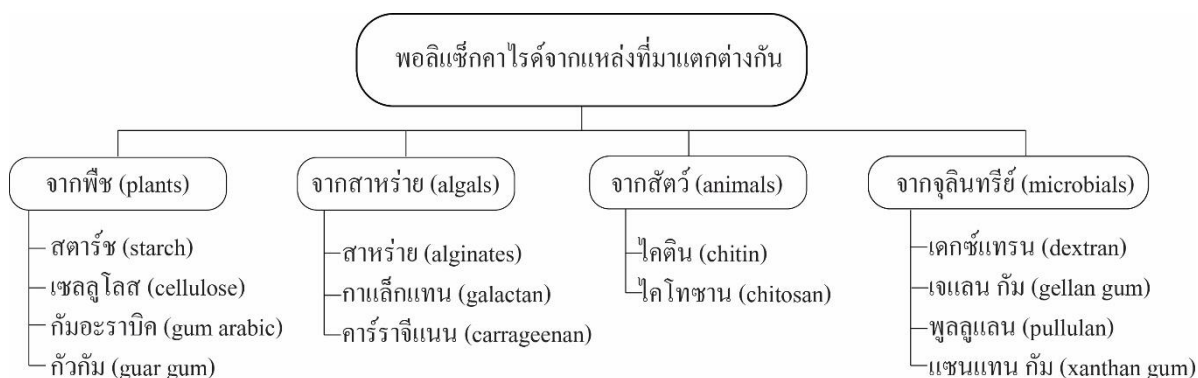
การตรวจเอกสาร

1. फिल्मบริโกลได้และการเคลือบ

ฟิล์มบริโกลได้และการเคลือบ (edible films and coating) เป็นชั้นบางของวัสดุพอลิเมอร์ที่ผลิตมาจากส่วนประกอบที่สามารถบริโกลได้ ทำให้บรรจุภัณฑ์หรือวัสดุนั้นปลอดภัยต่อการบริโกล ฟิล์มบริโกลได้และสารเคลือบมีหน้าที่ในการป้องกันออกซิเจน ความชื้นและป้องกันไม่ให้สิ่งที่บรรจุภายในเกิดความเสียหายจากสิ่งแวดล้อม (Hassan, Chatha, Hussain, Zia & Akhtar, 2018) โดยอาจเป็นส่วนหนึ่งของอาหารและถูกบริโกลไปพร้อมกับอาหารโดยตรง การใช้งานฟิล์มบริโกลได้ส่วนใหญ่มักมีการเติมพลาสติกไฮดรอกซี อัลคิลฟายเบอร์ สารลดแรงตึงผิวและ/หรือสารปรุงแต่งอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของฟิล์ม เช่น เพิ่มความคงตัว ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น (เพ็ญ โจม, 2554)

วัสดุพอลิเมอร์ที่ผลิตฟิล์มบริโกลได้และการเคลือบมักจำแนกตามโครงสร้างของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็นโปรตีน ไขมันและพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งสมบัติของวัสดุบริโกลได้นั้นแตกต่างกันตามวัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาผลิต โดยพอลิแซ็กคาไรด์เป็นที่นิยมในการนำมาผลิตวัสดุบริโกลได้เนื่องจากมีความหลากหลายของชนิดพอลิเมอร์และสามารถหาได้ง่าย จึงทำให้คุณสมบัติของวัสดุมีความหลาย โดยพอลิแซ็กคาไรด์จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยการซ้ำของโมโนแซ็กคาไรด์ ตั้งแต่ 2-60000 หน่วยโดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ผ่านการเชื่อมของพันธะไกลโคไซด์ิก โดยพอลิแซ็กคาไรด์สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ (ภาพที่ 1) (Yadav & Karthikeyan, 2019) ดังนี้

1943



ภาพที่ 1 การจำแนกพอลิแซ็กคาไรด์ตามแหล่งที่มา

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Yadav & Karthikeyan (2019)

2. สตาร์ช

สตาร์ชเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่พบในพืชถูกเก็บสะสมไว้ในเม็ดสตาร์ช (starch granule) สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ที่มีกลูโคสเป็นโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งแอลฟา-1,4 (α -1,4-glycosidic linkage) และพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งแอลฟา-1,6 (α -1,6-glycosidic linkage) สตาร์ชทั่วไปประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ แอมิโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin)

เม็ดสตาร์ชเป็นองค์ประกอบสำคัญของสตาร์ช ประกอบด้วย ออสัญฐาน (amorphous) และผลึก (crystalline) ซึ่งมาจากส่วนของแอมิโลสและอะไมโลเพกติน ตามลำดับโดยเม็ดสตาร์ชมีส่วนระหว่างแอมิโลสและอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1) ทำให้สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ของสตาร์ชแตกต่างกัน โดยความแตกต่างของสัดส่วนแอมิโลสและอะไมโลเพกตินขึ้นกับชนิดของแหล่งที่มา ขนาดโมเลกุล ระดับการเกิดพอลิเมอร์และการกระจายตัวของสายโซ่ (ปริศนา, 2561)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของแอมิโลสและอะไมโลเพกตินในพืชชนิดต่าง ๆ

ที่มาของสตาร์ช	แอมิโลส	อะไมโลเพกติน
ข้าวโพดแอมิโลสสูง	50-85	15-50
ข้าวโพด	26	74
ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn)	1	99
ข้าวสาลี	25	75
ข้าว	17	83
มันสำปะหลัง (cassava)	17	83
มันสำปะหลัง (tapioca)	17	83
มันฝรั่ง	21	79

ที่มา : Zobel & Stephen (2006)

2.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช

เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยสตาร์ชและมีการให้แรงเฉือน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายพอลิเมอร์ภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายและเกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ ซึ่งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำ (ปริศนา, 2561) ระหว่างกระบวนการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย น้ำแทรกเข้าภายใน การบวม ผลึกหลอม เคลือบผิวของอะไมโลเพกตินถูกทำลาย และเกิดการละลาย ซึ่งสิ่งเหล่านี้ที่เกิดขึ้นนั้นทำให้ความหนืดของสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น (Zobel & Stephen, 2006) การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวจะขึ้นกับชนิดของแป้ง (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2550)

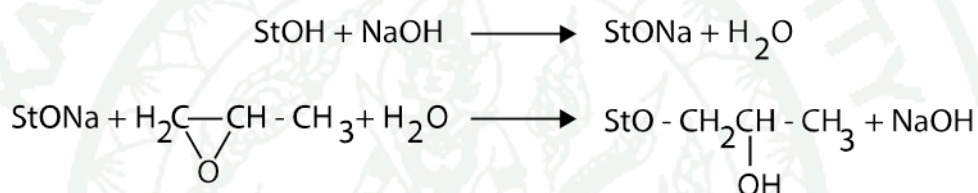
การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชมีผลต่อคุณภาพ การยอมรับ และอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์แป้งและสตาร์ช การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ของสตาร์ชที่ผ่านการเจลาติไนเซชัน แอมิโลสเป็นสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช เมื่อลดอุณหภูมิลงหรือปล่อยให้สตาร์ชเย็นตัว โมเลกุลแอมิโลสที่ละลาย

ออกมาเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายแอมิโลสด้วยกันหรือระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสและอะไมโลเพกตินที่อยู่ใกล้กันซึ่งจะพันกันเป็นเกลียวคู่ เกิดผลึกใหม่ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างแห 3 มิติ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอสัณฐานเป็นผลึก โครงสร้างผลึกของแอมิโลสที่เกิดการรีโทรเกรเดชันจะมีจุดหลอมเหลวสูง ทนกรด ทนความร้อน และทนการย่อยด้วยเอนไซม์ ปริมาณแอมิโลส ปริมาณอะไมโลเพกตินและส่วนประกอบชนิดอื่นๆในสตาร์ชส่งผลต่ออัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันในการเก็บรักษาระยะยาว ปัจจัยที่มีผลต่อการรีโทรเกรเดชัน ได้แก่ อัตราส่วนของแอมิโลสต่ออะไมโลเพกติน โครงสร้างของแอมิโลสและอะไมโลเพกติน อุณหภูมิในการเก็บเจลดสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ลิพิด สารลดแรงตึงผิว และเกลือ เป็นต้น

ความสามารถในการละลาย (solubility) ของสตาร์ชเกิดจากพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลแอมิโลสและอะไมโลเพกตินถูกละลาย ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว และโมเลกุลของน้ำสามารถจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้ ทำให้บางส่วนของสตาร์ชหลุดออก ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายออกมามากขึ้นหรือการละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายของสตาร์ชขึ้นกับสัดส่วนของแอมิโลสและอะไมโลเพกติน ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างสตาร์ช (ปริศนา, 2561) Panrong, Karbowiak & Harnkarnsujarit (2019) ศึกษาการละลายของฟิล์มผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป สตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปอะซิติกเลดและสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปออกเทนิลซัคซินเนต พบว่า สภาพการละลายนี้มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 4 ถึง ร้อยละ 29 ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปอะซิติกเลดมีค่าสภาพการละลายสูงที่สุด รองลงมาคือสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปออกเทนิลซัคซินเนต ฟิล์มผสมจากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปมีค่าสภาพการละลายสูงกว่าฟิล์มจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านกระบวนการตัดแปรรูป เนื่องจากการตัดแปรรูปด้วยการแทนที่ทำให้สตาร์ชมีขนาดโมเลกุลใหญ่จึงขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์สตาร์ช ส่งผลให้สภาพการละลายของ สตาร์ชตัดแปรรูปสูงขึ้น เช่นเดียวกับ Woggum, Sirivongpaisal & Wittaya (2015) ศึกษาการละลายโดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปกับสตาร์ชข้าวที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยโพธิ์ลิโนออกไซด์โดยวิธีการแทนที่ให้ได้สตาร์ชไฮดรอกซีโพธิ์ลิโน พบว่า สตาร์ชข้าวไฮดรอกซีโพธิ์ลิโนมีสภาพการละลายสูงกว่าฟิล์มสตาร์ชข้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูป เป็นผลจากการตัดแปรรูปสตาร์ชด้วยโพธิ์ลิโนออกไซด์ทำให้สตาร์ชมีความชอบน้ำมากขึ้นเนื่องจากการลดลงของอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่สตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชเป้งอ่อนตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายอิสระจึงทำให้สตาร์ชไฮดรอกซีโพธิ์ลิโนมีสภาพการละลายที่สูง

3. สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล

สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลเป็นสตาร์ชดัดแปรทางเคมีโดยการแทนที่ (substitution) ซึ่งดัดแปรสตาร์ชกับโพรพิลีนออกไซด์ (propylene oxide) ภายใต้สภาวะด่าง (alkaline condition) (Zhu, 2015) โดยการเกิดปฏิกิริยานี้เกิดจากการกระจายของเม็ดสตาร์ชกับโพรพิลีนออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) โดยการเกิดไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน (hydroxypropylation) เกิดที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 (C-2) ดังภาพที่ 2 หลังจากปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์จะทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปถูกทำให้เป็นกลาง (neutralized) มีการปรับความเป็นกรด-ด่างและทำให้ไฮดรอกซีโพรพิลเลตบริสุทธิ์ด้วยการชะล้าง ไล่น้ำออกและอบแห้ง



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิลเลชันของสตาร์ช

ที่มา : Zhu (2015)

การใช้งานของสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลขึ้นอยู่กับระดับการแทนที่ (level of substitution) (Wurzburg, 2006) โดยประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับการแพร่หรือการซึมผ่านของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และ etherifying agent เข้าสู่เม็ดสตาร์ช ซึ่งการดัดแปรไฮดรอกซีโพรพิลจะเพิ่มความชอบน้ำ (hydrophilicity) โดยทำหน้าที่ลดอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน นอกจากอุตสาหกรรมอาหารที่ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดและยังใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นสารเคลือบ ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มและสารยึดติด เป็นต้น (Vorwerk, Dijksterhuis, Borghuis, Radosta & Kröger, 2004)

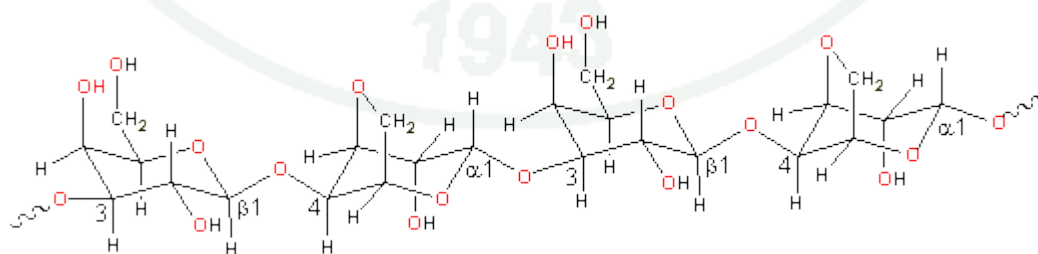
มันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต ซึ่งทวีปเอเชียจัดเป็นผู้ผลิตที่สำคัญ โดยองค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังประกอบด้วย เถ้า ร้อยละ 0.03-0.29 โปรตีน ร้อยละ 0.06-0.75 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.0029-0.0095 และเส้นใยร้อยละ 0.11-1.9 (Zhu, 2015) สตาร์ชมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบที่มีคุณสมบัติทางเคมีที่ดีเยี่ยมซึ่งใช้ประโยชน์ในการผลิตอาหาร

และวัสดุย่อยสลายทางชีวภาพ โดยทั่วไปนิยมใช้เป็นตัวเพิ่มความชื้นในกระบวนการแปรรูปอาหาร และเป็นส่วนเสริมในอุตสาหกรรมสิ่งทอและการผลิตกระดาษ (Colivet & Carvalho, 2017)

ข้าวเป็นธัญพืช (cereal grain) ชนิดหนึ่ง มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประกอบด้วยแอมิโลสและอะไมโลเพกติน แป้งข้าวจัดเป็นกลุ่มที่มีแอมิโลสสูง (ปริมาณแอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 15–30) แป้งข้าวมีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็ก เนื่องจากแป้งข้าวไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคือง นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้เนื่องจากแป้งข้าวมีปริมาณแอมิโลสสูงมาก (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2550)

4. อาการ์

อาการ์จัดเป็นไฮโดรคอลลอยด์ประเภทคาร์โบไฮเดรต เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดมาจากสาหร่ายสีแดง โครงสร้างทางเคมีของอาการ์ประกอบด้วย D-galactose และ 3,6-anhydro- β -galactose จัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เส้นตรงที่สลับกันระหว่างการเชื่อมของ α - (1,3) และ β - (1,4) (Stanley, 2006) อาการ์เกิดเจลที่ความเข้มข้นต่ำร้อยละ 0.04 อาการ์เป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำให้สารละลายมีความหนืดเมื่อละลายในน้ำร้อนและสามารถเกิดเจลย้อนกลับได้ (thermoreversible gels) เมื่อทำให้เย็น (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2550) อาการ์จึงเป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มสำหรับบรรจุอาหารที่สามารถย่อยสลายได้หรือสามารถบริโภคได้ ที่ให้สมบัติฟิล์มที่ใส แข็งแรง และสามารถต้านทานน้ำได้ปานกลาง (Phan The, Debeaufort, Voilley & Luu, 2009)



ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของอาการ์

ที่มา : Chaplin (2019)

5. มอลโทเดกซ์ทริน

มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตซึ่งผลิตจากการไฮโดรไลซ์แป้งด้วยกรดหรือเอนไซม์ซึ่งแบ่งตามค่าสมมูลเดกซ์โทรส (dextrose equivalent, DE) ค่าสมมูลเดกซ์โทรสเป็นค่าที่บ่งบอกระดับการย่อยสลายดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับมากน้อยเพียงใด (Blanchard & Katz, 2006) มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสต่างกันจะทำให้สมบัติทางเคมีกายภาพแตกต่างกัน เช่น การละลาย ความหนืด เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการไฮโดรไลซ์ที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเหมือนกันอีกด้วย แหล่งที่มาของสตาร์ชและอัตราส่วนของแอมิโลสและอะไมโลเพกติน (Galus, Mathieu, Lenart & Debeaufort, 2012) มอลโทเดกซ์ทรินมีสมบัติเป็นตัวลดผลึกให้กับวัสดุผสมและพัฒนาความคงตัวอาหาร อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ผลิตจากมอลโทเดกซ์ทรินมีข้อจำกัด เนื่องจากมีความชอบน้ำสูง สมบัติเชิงกลและสมบัติการป้องกันการซึมผ่านต่ำ จึงต้องทำการผสมกับวัสดุอื่นเพื่อพัฒนาสมบัติ (Zhang et al., 2019) ทั้งนี้ มอลโทเดกซ์ทรินยังนิยมใช้เป็นวัสดุเคลือบเนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับราคา ไม่มีสี ละลายน้ำได้ดี สามารถนำไปใช้ประโยชน์ ทางด้านการแพทย์ สามารถใช้เป็นอาหารเหลวสำหรับเด็กอ่อน หรือผู้ป่วยที่เป็นโรคเกี่ยวกับลำไส้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นยาเม็ดหรือใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะ (binder) ในการผลิตยาเม็ดที่ใช้เคี้ยวที่ด้านนอกแข็งแต่นุ่มด้านในหรือเป็นส่วนประกอบในการเคลือบยาเม็ด ขนมหวานที่เป็นเม็ดและธาตุอาหารต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ส่วนผสมมอลโทเดกซ์ทรินและเกลือโซเดียมคลอไรด์ใช้เคลือบโพแทสเซียมคลอไรด์ ส่วนผสมมอลโทเดกซ์ทรินและกรดฟูมาริกใช้เคลือบไอบิวพรופןเพื่อลดการระคายเคืองของหลอดอาหารและลำไส้ เป็นต้น (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2550)

6. แคปซูล

แคปซูลเป็นรูปแบบยาที่มีตัวยาคือของแข็งหรือของเหลวบรรจุอยู่ภายในเปลือก สามารถเตรียมได้จากแป้งหรือสารที่เหมาะสมอื่น ๆ แคปซูลแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดแข็ง (hard capsule) และชนิดนิ่ม (soft capsule) ซึ่งชนิดแข็งมี 2 ส่วน คือ ตัวแคปซูลและฝาเปิด ใช้บรรจุยา ส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง หรือเป็นผง นิยมใช้บรรจุยาปฏิชีวนะ แคปซูลชนิดนิ่มนิยมใช้ในการบรรจุน้ำมันหรือส่วนประกอบที่ไวต่อการละลายของน้ำ เช่น บรรจุน้ำมันตับปลา วิตามิน เป็นต้น (Ravindra, Archana, Vandana & Manisha, 2012) แคปซูลชนิดแข็งเป็นสิ่งสำคัญทางการแพทย์ โดยสามารถปกปิดกลิ่นและรสของยา ถูกใช้ในระบบการขนส่งยา ซึ่งส่วนมากแคปซูลถูกเตรียมจาก

เจลาติน โดยเจลาตินถูกผลิตจากกระดูกของสัตว์ ซึ่งทำให้เกิดปัญหากับกลุ่มผู้ใช้ที่เป็นอิสลาม และผู้ทานมังสวิรัต จึงทำให้มีการพัฒนาวัสดุเพื่อที่แทนที่การผลิตเปลือกแคปซูลจากเจลาติน เช่น ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) สตาร์ช และนาโนคริสตัลไลน์เซลลูโลส (Zhang et al., 2013b; Zhang et al., 2013; Zhang, Zhao, Wang, Jiang & Cha, 2017)

7. การละลายของยา

ยาจะละลายในตัวทำละลายในบริเวณที่จะเกิดการดูดซึมโดยตัวทำละลาย เช่น น้ำลาย หรือของเหลวในกระเพาะอาหารและลำไส้ การละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซึมยาเข้าสู่ร่างกาย และการออกฤทธิ์ (ศุภกัญญา และปิลันธนา, 2555) ยาที่ละลายได้ดีจะถูกดูดซึมได้รวดเร็ว กว่าตัวยาที่ไม่ละลายหรือละลายได้น้อย

การทดสอบการละลาย (Dissolution testing)

การทดสอบการละลายเป็นวิธีการทดสอบแบบ *in vitro* เพื่อดูผลว่าเมื่อรับประทานยาเข้าสู่ร่างกายแล้ว จะเกิดการละลายและดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้เพียงใด เป็นวิธีการที่สะดวกและประหยัดกว่าการทดสอบในร่างกายมนุษย์แบบ *in vivo* (การทดสอบภายในร่างกาย) การทดสอบการละลายเป็นหนึ่งในกระบวนการควบคุมคุณภาพเภสัชภัณฑ์ในรูปแบบของแข็ง เช่น ยาเม็ด ยาเม็ดเคลือบยาแคปซูล และระบบนำส่งยาแบบต่าง ๆ โดยมีหลักการการทดสอบการละลาย คือ นำยาละลายในของเหลวที่จำลองลักษณะของเหลวในทางเดินอาหาร (dissolution medium) และสภาวะจำลองภายในทางเดินอาหาร (ศุภกัญญา และปิลันธนา, 2555)

ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของแคปซูลยา

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของแคปซูล ซึ่งแปรผันตรงกับอัตราเร็วการละลาย
2. ลักษณะพหุสัณฐาน (polymorphism) เนื่องจากสารบางชนิดมีหลายสัณฐาน ซึ่งรูปผลึกที่แตกต่างกันจะส่งผลให้อัตราการละลายแตกต่างกัน ถ้าเลือกรูปผลึกที่ละลายน้ำได้ดีจะ

ทำให้ละลายได้เร็วและดูดซึมได้ดี ซึ่งหากอยู่ในรูปของผลึกจะละลายได้ช้ากว่าแบบที่เป็นอสัณฐาน เนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

3. สมบัติของตัวทำละลาย เนื่องจากตัวทำละลายส่งผลต่อความคงสภาพของยา และแคปซูล ซึ่งหากตัวทำละลายแตกต่างกันจะส่งผลต่ออัตราการละลายที่แตกต่างกัน เช่น หากตัวทำละลายมีความหนืดสูงจะทำให้อัตราการละลายลดลง เนื่องจากมีอัตราการแพร่ของตัวทำละลายลดลง

4. สภาวะร่างกาย แบ่งออกเป็น

4.1 ระยะเวลาในการขนส่งยาภายในลำไส้ ซึ่งยาส่วนมากจะถูกดูดซึมได้ดีที่ลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) และลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) ดังนั้นระยะเวลาที่ยาอยู่ในลำไส้เล็กส่วนนี้จะมีผลต่อการละลายและปริมาณยาจะถูกดูดซึม โดยปกติระยะเวลาที่ยาเคลื่อนที่ผ่านลำไส้ส่วนนี้ใช้เวลา 1-4 ชั่วโมง

4.2 ความเป็นกรดต่างของระบบย่อยอาหารซึ่งแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง และมีผลต่อสภาพการละลายและการแตกตัวของเปลือกแคปซูล

5. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มค่าการละลายของสารบางชนิด ซึ่งส่งผลให้เพิ่มอัตราเร็วของการละลาย ในทางตรงกันข้ามการลดอุณหภูมิอาจใช้ในการเพิ่มอัตราการละลายของสารบางชนิด

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตฟิล์มบริโกลได้และเปลือกแคปซูล

งานวิจัยที่ทำการผลิตฟิล์มบริโกลได้ประกอบด้วยวัสดุผสมทั้งพอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีนและไขมัน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มทั้งทางเคมี กายภาพ สัณฐานวิทยาและเชิงความร้อน

Luchese, Spada & Tessaro (2017) พบว่า ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูปร่างของสตาร์ชข้าวโพดเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยมและโค้งมน ส่วนสตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปร่างโค้งมน เมื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดการเจลาติไนซ์ของสตาร์ชข้าวโพดและ

มันสำปะหลังอยู่ที่ 59.7 องศาเซลเซียสและ 70.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นผลมาจากปริมาณของฟอสฟอรัสและการรวมตัวของแอมิโลสและลิพิด นอกจากนี้ยังทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสตาร์ช พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชจะทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังพัฒนาสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ เนื่องจากได้เพิ่มปริมาณของของแข็งทำให้โครงสร้างร่างแหของพอลิเมอร์นั้นแน่นขึ้น ปริมาณสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่า ความขรุขระของฟิล์มขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ชเป็นสำคัญ เมื่อปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณจะทำให้ฟิล์มมีสมบัติการต้านทานการหักและแข็งแรงมากขึ้นแต่หากใส่สตาร์ชในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีพฤติกรรมแข็งเปราะ (rigid)

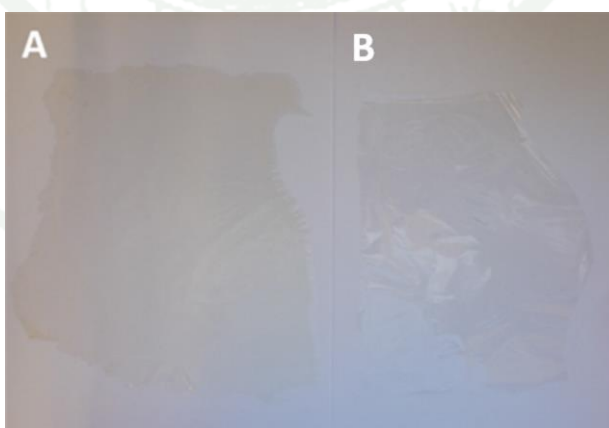
The et al. (2009) รายงานว่าวัสดุผสมระหว่างอาร์และสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ภาพตัดขวางมีการแยกเป็นสองเฟสคือทางด้านระเหยหลังจากอบแห้ง โครงสร้างมีรูพรุนและด้านตรงข้ามโครงสร้างแน่นและมีความเข้ากัน ลักษณะปรากฏของฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไส และเรียบ คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่า เมื่อผสมอาร์และสตาร์ชมันสำปะหลังค่าต้านทานแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มอาร์และฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลัง เนื่องจากมีการทำงานร่วมกันของอาร์และสตาร์ชมันสำปะหลังจึงนำไปสู่การสูญเสียของความแข็งแรงในการยึดติดของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามวัสดุผสมมีร้อยละการดึงยืดเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่น นอกจากนี้การผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังและอาร์ทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากอาร์มีโครงสร้างที่มีประจุของซัลเฟตซึ่งทำให้เกิดการขยายจึงทำให้มีความชอบน้ำมากขึ้น (hydrophilicity)

Tian, Xu, Yang & Guo (2011) รายงานว่า การขึ้นรูปฟิล์มผสมโปรตีนถั่วเหลืองและอาร์ด้วยวิธีที่แตกต่างกันจะทำให้คุณสมบัติที่ได้นั้นแตกต่างกัน โดยการศึกษาวิธีการขึ้นรูป 2 วิธี คือ การหล่อสารละลาย (casting solution) และการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (thermo-molding) จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่า ฟิล์มผสมที่ได้จากการหล่อสารละลายฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แยกเฟส ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเข้ากันที่ดีและมีความหนาแน่นของโครงสร้างสูง ในขณะที่วิธีขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ฟิล์มมีพื้นผิวหยาบ ไม่สม่ำเสมอ และมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอาร์มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำและค่าการดึงยืดสูงและเมื่อเพิ่มปริมาณอาร์ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง

เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลระหว่างโปรตีนถั่วเหลือง และอาร์คาคความต้านทานแรงดึงของฟิล์มที่ขึ้นด้วยวิธีการหล่อสารละลายนั้นมีค่ามากกว่าวิธีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เนื่องจากความเข้ากันได้และความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้าง

Galus et al. (2012) รายงานว่า ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองเมื่อเติมสตาร์ชหรือมอลโทเดกซ์ทริน มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้มีการเคลื่อนที่ของโครงสร้างเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เติมสตาร์ชจะมีค่าการต้านทานแรงดึงสูงกว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองแต่เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินค่าการต้านทานแรงดึงลดลงเนื่องจากมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองและพอลิแซ็กคาไรด์ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเรียบ ชุ่ม มีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีรูและรอยแตก

Sousa & Goncalves (2015) รายงานว่า อาการ์เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีคุณสมบัติที่ดีมากในการขึ้นรูปฟิล์มและมีกระบวนการผลิตที่ง่าย ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงเชิงกลดี มีคุณสมบัติการเป็นชั้นป้องกันอากาศปานกลาง มีคุณสมบัติชอบน้ำและเปราะ ลักษณะปรากฏและทางด้านฐานวิทยาศาสตร์ พบว่า ฟิล์มอาการ์และฟิล์มอาการ์ดัดแปรด้วยอัลคาไลด์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน คงตัวเมื่อเก็บรักษา ใส และเรียบ เมื่อเติมโลคัสปีนัม ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและความเหนียวให้กับฟิล์มอาการ์ ฟิล์มอาการ์มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของน้ำน้อยและการเพิ่มโลคัสปีนัมช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการกักน้ำของแผ่นฟิล์ม



ภาพที่ 4 ฟิล์มอาการ์ (A) และฟิล์มอาการ์ดัดแปรด้วยอัลคาไลด์ฟิล์มอาการ์และฟิล์มอาการ์ดัดแปรด้วยอัลคาไลด์ (B)

ที่มา : Sousa & Goncalves (2015)

Woggum et al. (2015) ศึกษาการดัดแปรสสารข้าวด้วยโพรพิลีนออกไซด์ ซึ่งระดับการดัดแปรที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติที่ต่างกัน เมื่อศึกษาสมบัติการเกิดเจลลิตในเซชัน พบว่าอุณหภูมิเจลลิตในเซชันมีค่าลดลงและพื้นที่ใต้จุดยอดที่ศึกษาด้วยเครื่องตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารด้วยคุณสมบัติทางความร้อนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่สตาร์ชส่วนอสัญฐานถูกทำลายทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นและเกิดการลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลว ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงเมื่อเติมโพรพิลีนออกไซด์ ในขณะที่ค่าการดึงยึดเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลิตทำลายพันธะไฮโดรเจนของสตาร์ชจึงลดการเกิดอันตรกิริยาของสายโซ่เอมิโลส นอกจากนี้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโพรพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากโพรพิลีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และเมื่อปริมาณโพรพิลีนออกไซด์มากขึ้นจะเพิ่มความชอบน้ำให้กับสตาร์ช

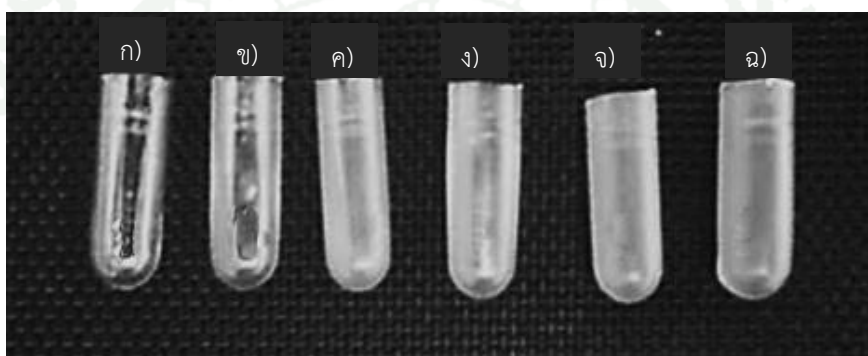
Zhang et al. (2013b) พัฒนาเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสผสมสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลิตด้วยวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์ พบว่า พื้นผิวของฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกันและเรียบ นอกจากนี้ความต้านทานแรงดึงและค่ามอดุลัสลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชในทางตรงกันข้ามการดึงยึดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความนิ่มและเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลิตมีความชอบน้ำและปริมาณความชื้นสูง ในขณะที่ความโปร่งแสงของเปลือกแคปซูลลดลงเมื่อปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแยกเฟสระหว่างไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสและสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลิต นอกจากนี้ความหนืดของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชส่งผลให้ความหนาของเปลือกแคปซูลเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5 เปลือกแคปซูลจากสารแขวนลอยไฮดรอกซีโพรพิล เมทิลเซลลูโลสผสมสตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิลิต ก) 100:0 ข) 70:30 ค) 50:50 ง) 30:70 และ จ) 0:100

ที่มา: Zhang et al. (2013b)

Zhang et al. (2013) พัฒนาเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากเจลาตินผสมสตาร์ชข้าวโพดไฮดรอกซีโพรพิล (ปริมาณเอมีโลสร้อยละ 80) ขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่มแม่พิมพ์ พบว่า มอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ชมากกว่าร้อยละ 50 ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืดลดลงเมื่อปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่าฟิล์มมีความแข็งแรงและเปราะมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ช นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสตาร์ชส่งผลให้พื้นผิวมีลักษณะนูนกระจายตัวอย่างหนาแน่น แสดงถึงการแยกเฟสของสตาร์ชและเจลาติน ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มสตาร์ชมีค่าน้อยกว่าฟิล์มเจลาติน เนื่องจากสตาร์ชมีความชอบน้ำมากกว่าเจลาตินส่งผลให้การผสมสตาร์ชจะทำให้สมบัติการละลายน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุแคปซูล

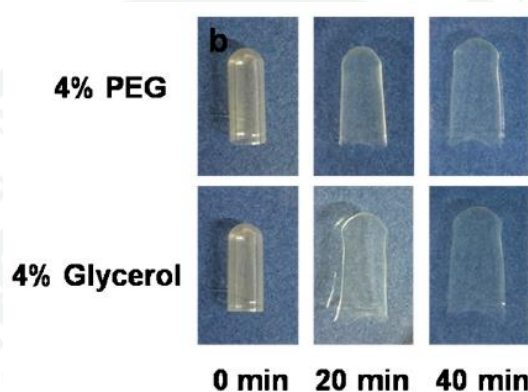


ภาพที่ 6 เปลือกแคปซูลจากสารแขวนลอยเจลาติน สตาร์ชข้าวโพดไฮดรอกซีโพรพิลที่ความเข้มข้นต่างกัน ก) 100:0 ข) 90:10 ค) 80:20 ง) 70:30 จ) 60:40 และ ฉ) 50:50

ที่มา: Zhang et al. (2013)

Chen et al. (2016) เตรียมเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากบุก (konjac glucomannan) ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2,2,6,6-เตตระเมทิล-1-ไพเพอริดีนออกซี (2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy) พบว่า ฟิล์มที่ถูกออกซิไดซ์ร้อยละ 80 ทำให้ฟิล์มชอบน้ำ ค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลง ค่าการดึงยืดและค่าแรงต้านทานการดึงของฟิล์มที่ถูกออกซิไดซ์มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์อัตราการละลายของแคปซูลบรรจุยาอิโรโมซิงนภายใต้สภาวะจำลองกระเพาะอาหาร พบว่า แคปซูลที่ระดับออกซิไดซ์ร้อยละ 30 ปลดปล่อยยาเมื่อเวลา 120 นาที และเปลือกแคปซูลสลายตัวที่เวลา 45-60 นาที ในขณะที่แคปซูลระดับออกซิไดซ์ร้อยละ 80 จะปลดปล่อยยาภายใน 30-45 นาทีและเปลือกของแคปซูลแตกภายใน 5-10 นาที เนื่องจากที่ระดับออกซิเดชันร้อยละ 80 มีความสามารถในการละลายน้ำและมีขั้วสูง

Zhang et al. (2017) เตรียมแคปซูลจากเปลือกนาโนเซลลูโลสผสมกับพอลิเอทิลีน-ไกลคอลและกลีเซอรอล เพื่อศึกษาสมบัติการพองของแคปซูลในสารละลายที่จำลองสภาวะของกระเพาะอาหาร พบว่า อัตราการพองเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากขนาดโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ นอกจากนี้เวลาในการปลดปล่อยยาแต่ละสูตรแตกต่างกันเล็กน้อย แคปซูลเริ่มแตกตัวที่เวลา 100 วินาทีและแตกตัวโดยสมบูรณ์ที่เวลา 300 วินาที ทั้งนี้การแตกตัวระหว่างแคปซูลเปลือกนาโนเซลลูโลสและแคปซูลในเชิงพาณิชย์ไม่มีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 7 การพองของเปลือกแคปซูลซึ่งใช้พลาสติกไซเซอร์ต่างชนิดกัน

ที่มา: Zhang et al. (2017)

Lal, Tanna, Kale & Mhaske (2016) ศึกษาประสิทธิภาพการเคลือบแคปซูลไฮดรอกซี-โพรพิลเมทิล เซลลูโลสด้วยแคพรีน (Kafirin) พบว่า ที่ pH 1.2 และ pH 6.8 ในช่วง 30 นาทีแรก แคปซูลมีการพองตัวใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงฟิล์มเริ่มมีการสลายตัวแทนการพอง นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการเคลือบและไม่เคลือบแคปซูลด้วยแคพรีน พบว่า ทั้งสองสูตรเกิดการปลดปล่อยยาอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาทีในกรด และเมื่อเวลาผ่านไป 35 นาทีจะปลดปล่อยยาได้ร้อยละ 37 และ 99 ตามลำดับ เนื่องจากไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสมีความชอบน้ำ ดูดความชื้นได้สูง และมีความสามารถในการเกิดเจล จึงเกิดการปลดปล่อยออกมาได้มากที่สุด

การพัฒนาสารเคลือบผิวซึ่งใช้ชื่อทางการค้าว่า Eudragit เพื่อควบคุมการปลดปล่อยยา โดยออกแบบคุณสมบัติให้สามารถควบคุมการละลายตามค่า pH ในระบบทางเดินอาหารของร่างกาย เป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเคลือบเปลือกแคปซูลหรือเม็ดยา โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง คือ Handali et al. (2018) รายงานว่า พื้นผิวของแคปซูลเจลาตินเรียบและเมื่อเคลือบด้วย Eudragit FS และทำงานรวมกันของ Eudragit FS และ Eudragit RS:RL พบว่า พื้นผิวเรียบ ไม่มีรูหรือรอยแตก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวิธีการจุ่มเคลือบเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงในการทำการทดลอง นอกจากนี้ พบว่า ไม่มีการปลดปล่อยยาที่ pH 1.2 (จำลองสภาวะกรดในกระเพาะอาหาร) ส่วนที่ pH 6.8 (จำลองลำไส้เล็กส่วนต้น) แคปซูลเริ่มมีการปลดปล่อยยาและที่ pH 7.4 และ 6.8 จะมีการปลดปล่อยยาซึ่งเป็นการจำลองลำไส้ส่วนกลางและส่วนปลาย ตามลำดับ Eudragit FS เป็นพอลิเมอร์ที่ไวต่อค่า pH ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลิกเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิเลตนำไปสู่การละลายของพอลิเมอร์ Eudragit FS ถูกใช้เป็นสารเคลือบนำไปสู่การปลดปล่อยที่ดีของยา อย่างไรก็ตาม Eudragit RL และ RS จะเป็นพอลิเมอร์ที่จะบวมน้ำทำให้เกิดการปลดปล่อยยา

Cole et al. (2002) รายงานว่า เมื่อทำการเคลือบแคปซูลไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสด้วย Eudragit พบว่า ชั้นของพอลิเมอร์ Eudragit เรียบแบน ไม่มีรูและรอยแตก แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างแคปซูลไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสกับเมทาคริเลตแบบประจุลบ (anionic methacrylate) นอกจากนี้ การละลายของแคปซูลไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่เคลือบด้วย Eudragit L30 D-55 และ Eudragit FS 30D พบว่า ไม่มีการปลดปล่อยยาพาราเซตามอลที่ pH 1.2 เวลา 2 ชั่วโมงและที่ pH 6.8 จะพบการปลดปล่อยของแคปซูลที่เคลือบด้วย Eudragit L30 D-55 เมื่อผ่านไป 1 ชั่วโมง ส่วน Eudragit FS 30D จะไม่มีการปลดปล่อยที่ pH 6.8 แคปซูลที่เคลือบด้วย Eudragit ทั้งสองจะมีการปล่อยยาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ใน pH 7.4 นอกจากนี้ระดับหรือปริมาณการเคลือบยังส่งผลต่อการละลายหรือปลดปล่อยของยา

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น พบว่า การผสมสตาร์ชกับพอลิเมอร์อื่นจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเปลือกแคปซูลและฟิล์มบริโกลได้ฐานสตาร์ช ทั้งนี้อาร์ และมอลโทเดกซ์ทรินเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการขึ้นรูปฟิล์มและการละลายน้ำแตกต่างกัน การปรับปรุงสูตรฟิล์มสตาร์ชโดยผสมวัตถุดิบทั้งสองจึงเป็นแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพการขึ้นรูปเปลือกแคปซูลและฟิล์ม การละลายน้ำ การปลดปล่อยยาจากวัสดุบรรจุ รวมถึงการผันแปรสัดส่วนของผสมอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์บริโกลได้ในด้านคุณสมบัติเชิงกล กายภาพ และการป้องกันการซึมผ่าน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุนำส่งสำหรับอาหารและการแพทย์ได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษา

อิทธิพลของสตาร์ชและวัสดุผสมพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน ที่มีต่อการขึ้นรูปและคุณสมบัติของเปลือกแคปซูลและฟิล์ม และศึกษาศักยภาพการใช้เปลือกแคปซูลในการควบคุมสภาพการละลาย สำหรับพัฒนาประสิทธิภาพเป็นระบบนำส่งควบคุมการปลดปล่อยยาและสารอาหารในตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย ซึ่งจะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตของเกษตรกรไทย



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

- 1.1. สตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล ระดับการแทนที่ 0.07-0.09 (SMS Corporation Co., Ltd, Thailand)
- 1.2. สตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล ระดับการแทนที่มากกว่า 0.09 (SMS Corporation Co., Ltd, Thailand)
- 1.3. สตาร์ชข้าวเจ้า (ปริมาณแอมิโลสร้อยละ 25.81) (Thai Flour Industry Co., LTD, Thailand)
- 1.4. อาการ์ (Thai Food and Chemical Co., Ltd, Thailand)
- 1.5. มอลโทเดกซ์ทริน สมมูลเดกซ์โทรส 10 (SMS Corporation Co., Ltd, Thailand)
- 1.6. กัสเซอรอล (Asian Scientific Co., Ltd., Thailand)
- 1.7. Hydrochloric acid 37% (HCl, Merck KGaA, Germany)
- 1.8. Potassium dihydrogen phosphate (Ajax Finechem, Australia)
- 1.9. Di-potassium hydrogen phosphate anhydrous (Ajax Finechem, Australia)
- 1.10. Eudragit® S100 (Evonik, Germany)
- 1.11. Eudragit® L100 (Evonik, Germany)
- 1.12. Eudragit® L100-55 (Evonik, Germany)

2. อุปกรณ์

- 2.1. เครื่อง Hotplate stirrer (Yellowline MSH Basic MSH B, Thailand)
- 2.2. เครื่อง Ultrasonic cleaner (950 TAE crest S/N: 09TE79044, USA)
- 2.3. ถาดพอลิสไตรีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร (Nuova Aptaca Srl., Italy)
- 2.4. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Satorius BP 3100S, Germany)
- 2.5. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Satorius 110S, Germany)
- 2.6. ตู้อบลมร้อน (WTB Binder FD R3 controller: ED53/E2, USA)
- 2.7. เครื่องอัดรีดสกรู (Labtech Engineering, Samut Prakan, Thailand)
- 2.8. เครื่องปั่นผสม (HM-275; Otto King Glass Co., Ltd., China)
- 2.9. ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ (HPP 110, Memmert, Germany)
- 2.10. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (WNB7, Memmert, Germany)
- 2.11. เครื่องทดสอบวิทยากระแส (Kinexus Pro+, Malvern Panalytical Ltd., UK)
- 2.12. เครื่องทดสอบแรงดึง (Instron test machine) (5965, Intron, UK)
- 2.13. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeation analyzer) (Model 8501, Illinois, USA)
- 2.14. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Dataphysics OCA15EC, Dataphysics Instruments GmbH, Germany)
- 2.15. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (JSM-IT300, JEOL Ltd., USA)
- 2.16. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (JSM-6610 Series Scanning Electron Microscope, JEOL Ltd., USA)
- 2.17. เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) (Evolution 300 UV-Vis Spectrophotometer, Thermo Fisher Scientific, USA)
- 2.18. เครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น Genesys 10 uv , Thermo Fisher Scientific, USA)
- 2.19. เครื่องมือฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer) (Tensor 27 FTIR, Bruker Corporation, Germany)
- 2.20. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analyzer, DMA) (Eplexor®; Gabo Qualimeter, Ahlden, Germany)

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลายและการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีหล่อสารละลาย (solution casting)

เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวโดยผสมสตาร์ชข้าวเจ้า อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน ตามสัดส่วนในตารางที่ 2 โดยมีปริมาณของแข็งร้อยละ 5 โดยมวล จากนั้นเติมกลีเซอรอลร้อยละ 35 โดยมวลของปริมาณของแข็งและเติมน้ำกลั่น กวนจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เวลา 90 นาทีและให้ความร้อนจนอุณหภูมิสารแขวนลอยเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นไล่ฟองด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์เป็นเวลา 3 นาที เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล ระดับการคัดแปร 0.07-0.09 เช่นเดียวกับการเตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวแต่กวนจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เวลา 60 นาที จากนั้นผสมสารแขวนลอยสตาร์ชทั้ง 2 ชนิดในอัตราส่วนของสตาร์ชข้าวต่อสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล เท่ากับ 50 ต่อ 50 จากนั้นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที เทสารแขวนลอยลงบนถาดพอลิสไตรีนโดยมีน้ำหนัก 38 ± 2 กรัม อบตัวอย่างให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 ชั่วโมงและเก็บรักษาภายในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 (ดัดแปลงวิธีจาก จูติรัตน์, 2561)

2. การวิเคราะห์สมบัติของสารแขวนลอย

วิเคราะห์คุณสมบัติวิทยากระแสของสารแขวนลอยสตาร์ชด้วยเครื่องทดสอบวิทยากระแสโดยใช้ไม้พายสำหรับสตาร์ช (starch paddle) และติดตั้งถ้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยวิธี oscillatory temperature sweep โดยใช้สารละลายผสมปริมาตร 30 มิลลิลิตรทดสอบอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส และเพิ่มจนถึง 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 1 องศาเซลเซียส ต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิจนถึง 10 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมของสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน

สูตร	สตาร์ช (S) (ร้อยละโดยมวล)	อาการ์ (A) (ร้อยละโดยมวล)	มอลโทเดกซ์ทริน (M) (ร้อยละโดยมวล)
S10A0M0	100	0	0
S09A1M0	90	10	0
S08A2M0	80	20	0
S07A3M0	70	30	0
S08A2M0	80	20	0
S06A2M2	60	20	20
S04A2M4	40	20	40
S03A2M5	30	20	50
S02A2M6	20	20	60

3. การวิเคราะห์สมบัติฟิล์ม

ก่อนการวิเคราะห์สมบัติฟิล์มเก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง และทดสอบดังนี้

3.1 สันฐานวิทยาของฟิล์มวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เตรียมฟิล์มขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร และ 1 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร เพื่อทดสอบบริเวณพื้นผิว (surface) และตัดขวาง (cross section) ตามลำดับ เตรียมตัวอย่างตัดขวางด้วยใบมีดตัดบริเวณกึ่งกลางของฟิล์ม ตัดตัวอย่างลงบนฐานวางตัวอย่าง (stub) ด้วยเทปคาร์บอน จากนั้นนำตัวอย่างไปฉายด้วยอนุภาคทองแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บันทึกภาพที่กำลังขยาย 1000 เท่า

3.2 สมบัติเชิงกลพลวัต ตัดฟิล์มขนาด 1 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร จำนวน 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง โดยใช้โหมดการทดสอบแบบดึงยืด (tension mode) ผ่านเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต กำหนดค่าน้ำหนักอพลวัต (static load) และ น้ำหนักพลวัต (dynamic load) เท่ากับ 1 และ 0.3 นิวตัน ตามลำดับ การยืดตัวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.3 ช่วงอุณหภูมิ -100 ถึง 100 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความถี่ 0.5, 1 และ 5.0 เฮิร์ตซ์ (Nguyen Vu & Lumdubwong, 2016)

3.3 สเปกตรัมอินฟราเรดวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยการดูดซับคลื่นอินฟราเรด ตัดตัวอย่างขนาด 1 เซนติเมตร x 1 เซนติเมตร เก็บรักษาตัวอย่างในกล่องบรรจุซิลิกาเจลอย่างน้อย 48 ชั่วโมง ทดสอบโดยสแกนช่วงเลขคลื่น 500 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} ด้วยระบบ attenuated total reflectance (Rocha et al.) จำนวน 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง

3.4 สมบัติทางกลโดยทดสอบค่าต้านทานแรงดึง (tensile strength) การดึงยืด (elongation) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882-12 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ตัดฟิล์มขนาด 2.5 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร และวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ตัวอย่างละ 5 จุด ทดสอบตัวอย่างละ 10 ซ้ำ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวจับ 5 เซนติเมตรและความเร็วในการดึงยืด 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าที่แสดงคือ ค่าต้านทานแรงดึงสูงสุด (maximum tensile stress) การดึงยืด (Tensile strain at Break) และค่ามอดูลัสของยังมาจากการคำนวณ ดังสมการ

$$\text{มอดูลัสของยัง (MPa)} = \text{ความชัน} \left(\frac{\text{MPa}}{\%} \right) \times 100\%$$

โดยความชันมาจากความสัมพันธ์ของเส้นตรง ($R^2 = 1$) ระหว่างค่าต้านทานแรง (tensile stress) และการดึงยืด (tensile strain)

3.5 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ โดยใช้เครื่องทดสอบมุมด้วยโปรแกรม SCA 20 โดยตัดตัวอย่างขนาด 1 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร ปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ 3 ไมโครลิตร ทดสอบตัวอย่างละ 10 ซ้ำ โดยวิเคราะห์มุมสัมผัสภายหลังหยดน้ำกลั่นและบันทึกภาพทันที โดยวิเคราะห์แต่ละตัวอย่างจำนวน 10 หยด รายงานค่าที่ได้ในหน่วยองศา ซึ่งบอกถึงค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวของฟิล์ม

3.6 สมบัติสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำทดสอบด้วยวิธี Cup method (ASTM E96-80) โดยตัดฟิล์มเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้น แล้ววัดความหนาของฟิล์มบรรจุซิลิกาเจลลงในถ้วยอลูมิเนียมถ้วยละ 25 กรัม ปิดผนึกฟิล์มกับถ้วยทดสอบด้วยพาราฟิน บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นของถ้วยอลูมิเนียมก่อนนำไปในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จดบันทึกน้ำหนักทุกวันจนน้ำหนักคงที่ คำนวณค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำจากความชันของกราฟ ($R^2 \geq 0.994$) ในช่วงของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาแล้วนำไปคำนวณค่าสภาพให้ซึมผ่านของไอน้ำ ดังสมการ

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านของไอน้ำ} = \frac{(\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ} \times \text{ความหนาของฟิล์ม})}{\text{ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่าง 2 ด้านของฟิล์ม}}$$

3.7 สมบัติสภาพให้ซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ตัดฟิล์มเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สำหรับสูตรที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อสารละลาย นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน คำนวณการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนผ่านสมการ (ASTM D 3985-81) ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ

$$\begin{aligned} \text{สภาพให้ซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน} \\ = \frac{(\text{อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน} \times \text{ความหนาของฟิล์ม})}{\text{ความแตกต่างของความดันของแก๊สระหว่าง 2 ด้านของฟิล์ม}} \end{aligned}$$

3.8 การส่องผ่านของแสงทดสอบด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ตัดตัวอย่างขนาด 3 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร วางบนแผ่นเหล็กที่มีช่องเปิดตรงกลาง ปิดด้วยแผ่นแม่เหล็กก่อนทำการวิเคราะห์ นำไปวิเคราะห์การส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ด้วยความเร็ว 600 นาโนเมตรต่อนาที ทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.9 สมบัติการละลาย (คัดแปลงจาก Lal et al., 2016) วิเคราะห์การละลายของวัสดุที่อุณหภูมิ 37 ± 0.5 องศาเซลเซียส โดยชั่งฟิล์มตัวอย่างขนาด 1 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร จำนวน 5 ซ้ำ อบแห้งตัวอย่างที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บในเดซิเคเตอร์ที่มีซิลิกาเจลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักเริ่มต้นด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริก (HCl, pH=1 จำลองสภาวะกระเพาะอาหาร) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยให้ฟิล์มอยู่ได้

ตัวทำละลายทั้งชิ้น ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที และ 1, 4, 24, 48, 72 ชั่วโมง แล้วนำฟิล์มออกจากสารละลายนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ คำนวณโดยผ่านสมการ

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

4. การขึ้นรูปเปลือกแคปซูล

เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวโดยผสมสตาร์ชข้าวเจ้า อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน ตามสัดส่วนในตารางที่ 2 โดยมีปริมาณของแข็งร้อยละ 7 โดยมวล จากนั้นเติมกลีเซอรอลร้อยละ 35 โดยมวลของปริมาณของแข็งและเติมน้ำกลั่น กวนจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เวลา 90 นาทีและให้ความร้อนจนอุณหภูมิสารแขวนลอยเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นไล่ฟองด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์เป็นเวลา 3 นาที เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล ระดับการตัดแปรร 0.07-0.09 เช่นเดียวกับการเตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวแต่กวนจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เวลา 60 นาที จากนั้นผสมสารแขวนลอยสตาร์ชทั้ง 2 ชนิดในอัตราส่วนของสตาร์ชข้าวต่อสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล เท่ากับ 50 ต่อ 50 จากนั้นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นขึ้นรูปเป็นเปลือกแคปซูลด้วยวิธีจุ่มด้วยแม่พิมพ์พอลิโพรพิลีนเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร ในสารละลายเป็นเวลา 30 วินาที และนำขึ้นจากสารแขวนลอยทิ้งไว้ในอากาศเป็นเวลา 30 วินาที จึงจุ่มซ้ำ จำนวนการจุ่มทั้งสิ้น 8 ครั้ง จากนั้นนำแม่พิมพ์ที่มีฟิล์มเคลือบผิวอยู่อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นแกะเปลือกแคปซูลออกจากแม่พิมพ์ เก็บรักษาภายในตู้ลดความชื้นด้วยไฟฟ้าที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 (ดัดแปลงจาก จูติรัตน์, 2561)

5. การวิเคราะห์การปลดปล่อยยาและการเคลือบผิวเปลือกแคปซูล

5.1 เตรียม Eugragit L100 และ S100 โดยเตรียมสารละลายผสมที่มีอะซิโตน ไอโซโพรพานอลและน้ำกลั่น (ตารางที่ 3) คนให้เข้ากันจากนั้นบ่งสารละลายผสมเพื่อใช้ในการเตรียมสารแขวนลอย Eugragit ร้อยละ 50 และสารแขวนลอยเพิ่มปริมาณร้อยละ 50 การเตรียมสารแขวนลอย Eugragit เตรียมโดยเติม Eugragit L100 หรือ S100 อย่างช้าๆ ในสารละลายผสมคนให้เข้ากันเป็น

เวลา 30-60 นาที การเตรียมสารแขวนลอยเพิ่มปริมาณเตรียมโดยเติมทัลก์และไตรเอทิลซิเตรท อย่างช้าๆในสารละลายผสม ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำ สารแขวนลอยเพิ่มปริมาณที่ได้เติมลงในสารแขวนลอย Eudragit ที่เตรียมไว้อย่างช้าๆ คนให้เข้ากัน และกรองด้วยกระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเคลือบแคปซูล (อ้างอิงวิธีการ เตรียมจาก www.evonik.com)

5.2 เตรียมสารเคลือบ Eudragit L100 -55 โดยเติม Eudragit L100-55 ปริมาณดังตารางที่ 3 ในน้ำกลั่นอย่างช้าๆ คนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างช้าๆ คนให้ เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที เตรียมสารแขวนลอยโดยเติมทัลก์และไตรเอทิลซิเตรท อย่างช้าๆใน สารละลายผสม ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอย เพิ่มปริมาณที่ได้เติมลงในสารแขวนลอย Eudragit ที่เตรียมไว้อย่างช้าๆ คนให้เข้ากันและกรองด้วย กระดาษกรองขนาดรูพรุน 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเคลือบแคปซูล (อ้างอิงวิธีการเตรียมจาก www.evonik.com)

ตารางที่ 3 ร้อยละโดยน้ำหนักของสารเคมีสำหรับเตรียมสารเคลือบ Eudragit L100, S100 และ L100-55

สารเคมี	ปริมาณของสารเคมีสำหรับ เตรียม Eudregit L100 และ S100 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณของสารเคมีสำหรับ เตรียม Eudregit L100-55 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Eudragit	6.25	30
อะซิโตน (acetone)	34.29	-
ไอโซโพรพานอล (isopropanol)	51.42	-
น้ำกลั่น	4.29	60
ทัลก์ (talc)	3.125	6.25
ไตรเอทิลซิเตรท (triethyl citrate)	0.625	1.25
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (1N NaOH)	-	6

5.3 การปลดปล่อยยาพาราเซตามอลของเปลือกแคปซูล ตัดเปลือกแคปซูลขนาด 1.5 เซนติเมตร เพื่อบรรจุผงยาพาราเซตามอล 0.1 กรัมต่อ 1 เม็ด ปิดแคปซูลที่บรรจุผงยาด้วยเปลือกแคปซูล จากนั้นเคลือบด้วยสารละลาย Eudragit S100, L100 และ L100-55 โดยการจุ่มเป็นเวลา 10 วินาทีและอบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เก็บรักษาภายในตู้ลดความชื้นด้วยไฟฟ้าที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากเก็บรักษานำมาทดสอบการปลดปล่อยยาพาราเซตามอลโดยแช่แคปซูลที่บรรจุยาในขวดแก้วขนาด 40 มิลลิลิตรด้วยสารละลายปริมาตร 30 มิลลิลิตรต่อชนิด ที่อุณหภูมิ 37 ± 0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งทดสอบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (pH=1 จำลองสภาวะกระเพาะอาหาร) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเปลี่ยนจากสารละลายกรดจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตโดยการเทสารละลายกรดไฮโดรคลอริกออกและจากนั้นเทสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (pH=6.8 จำลองสภาวะลำไส้) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเปลี่ยนสารละลายด้วยวิธีการเทสารละลายเดิมและแทนที่ด้วยสารละลายเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (pH=7.4 จำลองสภาวะลำไส้) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายแต่ละช่วงวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องยูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 305 นาโนเมตร รายงานเป็นหน่วยของความเข้มข้น (ppm) เทียบจากกราฟมาตรฐาน โดยกราฟมาตรฐานเตรียมจากสารมาตรฐานที่นำผงพาราเซตามอลละลายในกรดไฮโดรคลอริก ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 62.5, 31.25, 15.625, 7.8125 และ 0 ppm จากนั้นนำสารมาตรฐานวัดความเข้มข้นที่ความยาวคลื่น 305 นาโนเมตร จำนวน 3 ซ้ำ (ดัดแปลงจาก Handali et al., 2018; Lal et al., 2016)

6. การเตรียมฟิล์มสตาร์ชผสมด้วยวิธีการอัดรีด (extrusion)

อบสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล ระดับการดัดแปรมากกว่า 0.09 อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผสมสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน ดังตารางที่ 3 กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสม ในอัตราส่วน น้ำหนักของของแข็ง : น้ำหนักของกลีเซอรอล เท่ากับ 100:35 เป็นเวลา 3 นาที นำไปผลิตฟิล์มโดยใช้ความร้อนและแรงเหนือนด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่มีอุณหภูมิจากบาเรลจนถึงหน้าแม่พิมพ์และความเร็วสกรู ดังตารางที่ 4 จากนั้นฟิล์มผ่านหน้าแม่พิมพ์แบบช่อง (slit die) ขนาด 100 มิลลิเมตร $\times$ 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม ดังตารางผนวกที่ 3

ตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนของปริมาณของแข็งในการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการอัดรีด

สูตร	ร้อยละของปริมาณ	ร้อยละของวุ้น (A)	ร้อยละของมอลโท-
	สตาร์ช (S) (ร้อยละโดยมวล)	(ร้อยละโดยมวล)	เดกซ์ทริน (M) (ร้อยละโดยมวล)
S100A0M0	100	-	-
S80A20M0	80	20	-
S60A20M0	60	40	-
S80A0M20	80	-	20
S60A20M20	60	20	20

ตารางที่ 5 แสดงอุณหภูมิจากบารเรชันถึงหน้าแม่พิมพ์และความเร็วของสกรู

สูตร	อุณหภูมิจากบารเรชันถึงหน้าแม่พิมพ์	ความเร็วของสกรู
	(องศาเซลเซียส)	(รอบต่อนาที)
S100A0M0	90/110/120/120/130/140/145/145/140/140	80
S80A20M0	90/110/120/120/130/145/150/150/160/160	75
S60A20M0	90/110/120/120/130/145/150/150/160/160	80
S80A0M20	90/110/120/120/130/145/150/150/160/160	80
S60A20M20	90/110/120/120/130/145/150/150/160/150	80

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 20 โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยประกอบด้วยการศึกษาบทบาทของสัดส่วนวัสดุผสมสตาร์ช อาการ์และมอลโท-เดกซ์ทริน ต่อการขึ้นรูปเป็นเปลือกแคปซูลชนิดแข็งด้วยวิธีจุ่มด้วยแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดแผ่นฟิล์มเคลือบผิวแม่พิมพ์ และขึ้นรูปเป็นฟิล์มบริโภคนได้เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุ ซึ่งเป็นตัวแทนคุณสมบัติของเปลือกแคปซูล หรือการประยุกต์ใช้เป็นแผ่นฟิล์มบรรจุอาหาร ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมหรือยา มีการนำเปลือกแคปซูลที่ได้มาบรรจุยาโดยใช้ยาพาราเซตามอลเป็นตัวแทนยาในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์การปลดปล่อยยาในสภาวะจำลองของร่างกาย สำหรับประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อย นอกจากนี้ได้ทดสอบบทบาทของส่วนผสมทั้งสามต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดเป็นแผ่นฟิล์มสำหรับการพัฒนาวัตถุดิบในการผลิตเปลือกแคปซูลนี้ต่อไป ผลการทดลองประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. วิเคราะห์เสถียรภาพของสารแขวนลอย

พฤติกรรมการไหลของสารแขวนลอยผสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแสดงด้วยการวิเคราะห์วิทยากระแสหรือรีโอโลยี (rheology) ภาพที่ 8ก. แสดงให้เห็นว่ามอดูลัสสะสมซึ่งบ่งชี้พลังงานที่สะสมไว้ในวัสดุหรือความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งแสดงถึงการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช เนื่องจากเม็ดสตาร์ชพอง บวมและเกิดความเสียหายรูปร่างทำให้องค์ประกอบสตาร์ชกระจายออกสู่สภาพแวดล้อมระหว่างทำให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ซึ่งพบการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสสะสมที่มีจุดสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 62, 72 และ 82 องศาเซลเซียส บ่งชี้องค์ประกอบสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนซ์จำนวน 3 องค์ประกอบ ได้แก่ สตาร์ชข้าว สตาร์ชมันสำปะหลังที่มีการดัดแปรหรือโมเลกุลแอมิโลเพกตินน้ำหนักรวมโมเลกุลต่ำ และสตาร์ชมันสำปะหลังส่วนที่ไม่มีการดัดแปรตามลำดับ (Hsu, Lu & Huang, 2000; Talou, Villar, Camerucci & Moreno, 2011)

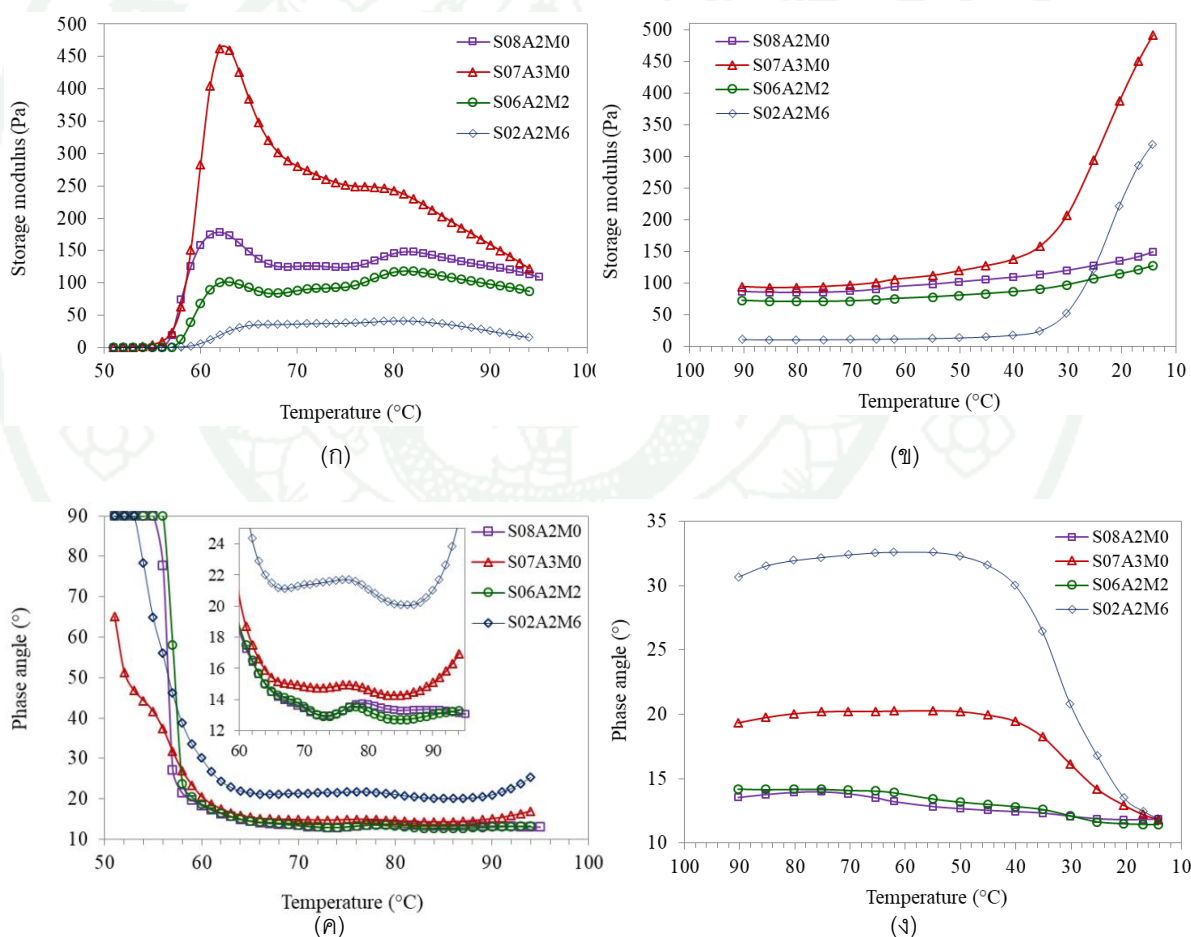
การเพิ่มปริมาณสตาร์ชจะทำให้ค่ามอดูลัสสะสมสูงสุดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีแอมิโลสและแอมิโลเพกตินรวมถึงเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ (Hu, Chen, Xu, Chen & Zhao, 2020) ที่ศึกษาสมบัติวิทยากระแสของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณของแอมิโลสแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของสตาร์ช พบว่า สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณของแอมิโลสสูงจะมีค่ามอดูลัสสะสมสูงกว่าสตาร์ชข้าวที่มี

ปริมาณของแอมิโลสต่ำ โดยน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลสและความยาวในการกระจายตัวของโพลิเพกตินนั้นส่งผลต่อค่ามอดุลัสสะสมสำหรับเจลข้าวที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดสตาร์ชเมื่อบวมอย่างสมบูรณ์แล้วจะทำให้แอมิโลสที่ถูกกลายจะกระจายตัวในอะไมโลเพกตินที่บวมอย่างสมบูรณ์และสายโซ่ทั้งภายในและภายนอกของอะไมโลเพกตินที่บวมอย่างสมบูรณ์นั้นจะเกิดการพันกันซึ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมิโลสและอะไมโลเพกตินนั้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวและเพิ่มความแข็งของโครงสร้างเจลข้าว ในขณะที่การเติมอาร์ (S07A3M0) จะทำให้จุดยอดสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากอาร์ดูดซับน้ำได้ดีทำให้ปริมาณน้ำอิสระในระบบลดลง และอาร์เกิดการพองตัวเมื่อดูดซับน้ำ รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและไฮโดรคอลลอยด์ สอดคล้องกับ Nagar, Sharanagat, Kumar, Singh & Mani (2019) ที่ทำการศึกษาการเติมอาร์และแซนแทนกัม (xanthan gum) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ (อาร์และแซนแทนกัม) จะทำให้ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก การเติมไฮโดรคอลลอยด์จะเพิ่มโครงสร้างยืดหยุ่น (elastic structure) ของเจลสตาร์ชและเกิดการเชื่อมของโครงร่างแหที่แข็งแรงจึงทำให้ค่ามอดุลัสสะสมที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ เมื่อเม็ดสตาร์ชพองจนเกิดการแตกเสียรูปร่างและทำให้ค่ามอดุลัสสะสมลดลงเนื่องจากสูญเสียอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างเม็ดสตาร์ชและโครงร่างพอลิเมอร์ (Li & Yeh, 2001)

มุมเฟส (Phase angle, °) ของวัสดุที่มีสมบัติทั้งเหลวและยืดหยุ่น (viscoelastic) ของวัสดุเป็นการบ่งชี้ถึงพฤติกรรมคล้ายของแข็ง และคล้ายของเหลวเมื่อมีค่ามุม 0 องศา และ 90 องศาตามลำดับ จึงใช้เป็นดัชนีบ่งบอกการเปลี่ยนสถานะของวัสดุและการเกิดเจล ภาพที่ 8ก. แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transition) จากสมบัติคล้ายของเหลวไปยังสมบัติคล้ายของแข็ง เนื่องจากมุมเฟสมีค่าลดลง (จากค่ามุม 90 องศาถึงค่ามุม 10 องศา) ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่ามุมเฟสลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดเจลาติไนซ์ ทำให้สารแขวนลอยมีคุณสมบัติคล้ายของแข็งมากขึ้น S02A2M6 มีค่ามุมเฟสสูงที่สุดบ่งชี้ว่ามีพฤติกรรมคล้ายของแข็งน้อยที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสตาร์ชน้อยที่สุด ในขณะที่ S08A2M0 นั้นมีค่ามุมเฟสน้อยที่สุดซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากที่สุด พิกของมุมเฟสขนาดเล็กในช่วง 74-84 องศาเซลเซียสนั้นบ่งชี้การเปลี่ยนเฟสของสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งจะเห็นได้จากค่ามอดุลัสสะสมที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังภาพที่ 8ก.

ในช่วงของการลดอุณหภูมิ (cooling) จะพบการเพิ่มขึ้นของมอดุลัสสะสมภาพที่ 8ข. และภาพที่ 8ง. ในขณะที่ค่ามุมเฟสจะลดลง บ่งชี้การเกิดเจล (gelation) ของอาร์และเกดรีโทรเกรเดชัน

(retrogradation) หรือการคืนตัวของสตาร์ชทำให้มีพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (Kaur, Singh, Singh & McCarthy, 2008) โดย S07A3M0 มีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียสและมีค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ในขณะที่ S08A2M0 และ S06A2M2 มีพฤติกรรมระหว่างการลดอุณหภูมิคล้ายกันและพบว่าค่ามอดุลัสสะสมลดลงตามปริมาณสตาร์ช นอกจากนี้ S02A2M6 ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งมอดุลัสมีค่าลดลง สอดคล้องกับปริมาณที่ต่ำสุดและบ่งชี้ว่าเมื่อปริมาณสตาร์ชลดลง พฤติกรรมของของไหลในช่วงการลดอุณหภูมิไม่ได้ขึ้นกับสตาร์ชแต่ขึ้นกับปริมาณอาหาร เนื่องจากมีพฤติกรรมคล้ายกับ S07A3M0 ดังนั้น การเกิดเจลขึ้นอยู่กับอาหารซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในพฤติกรรมการไหลในช่วงของการลดอุณหภูมิ



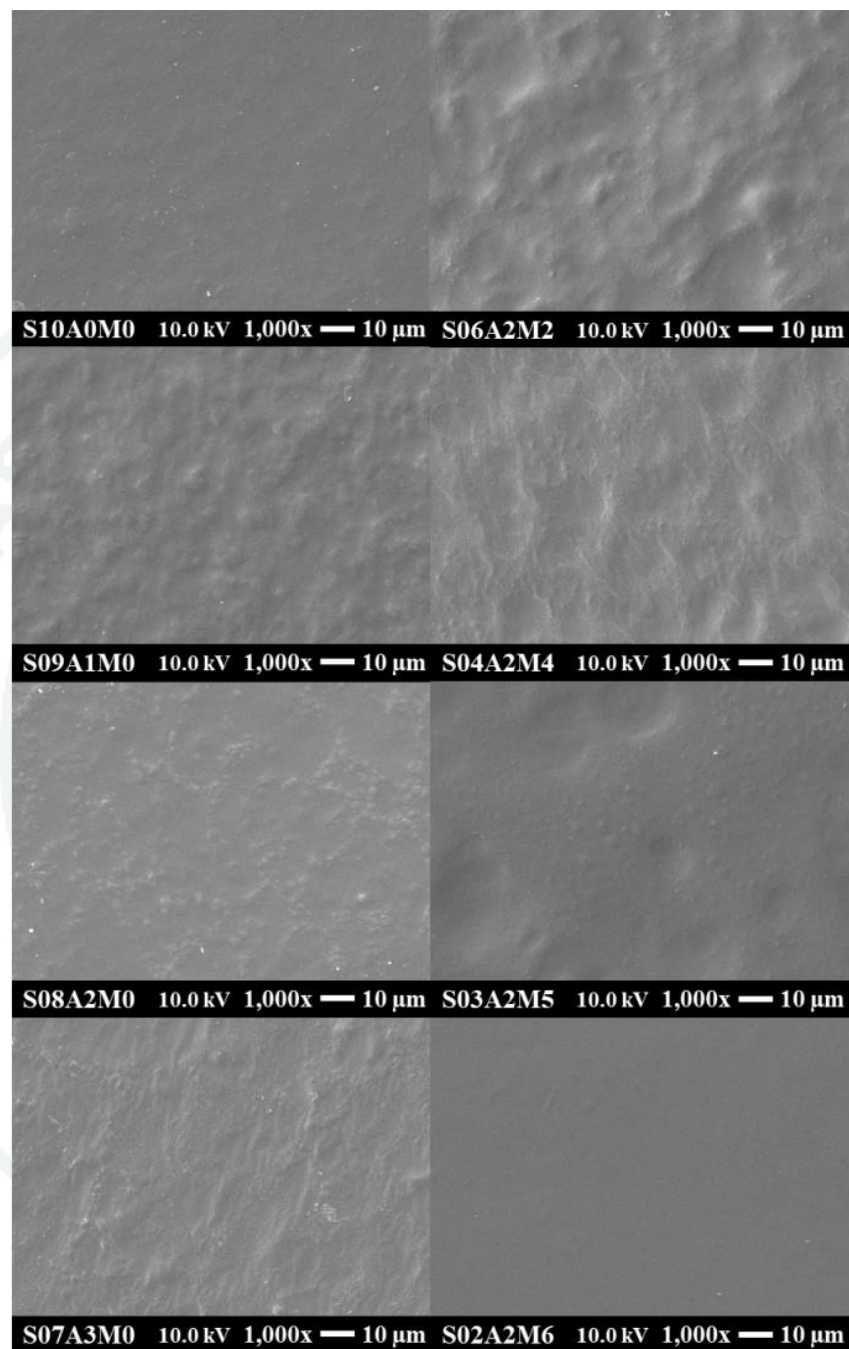
ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติวิทยากระแสของสารแขวนลอยสตาร์ช (S) อาหาร (A) และมอลโท-เดกซ์ทริน (M) ผสมโดยมีอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย (ก) (ข) คือ มอดุลัสสะสม และ (ค) (ง) คือ มุมเฟส ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ และลดอุณหภูมิ

2. สันฐานวิทยาและคุณสมบัติฟิล์ม

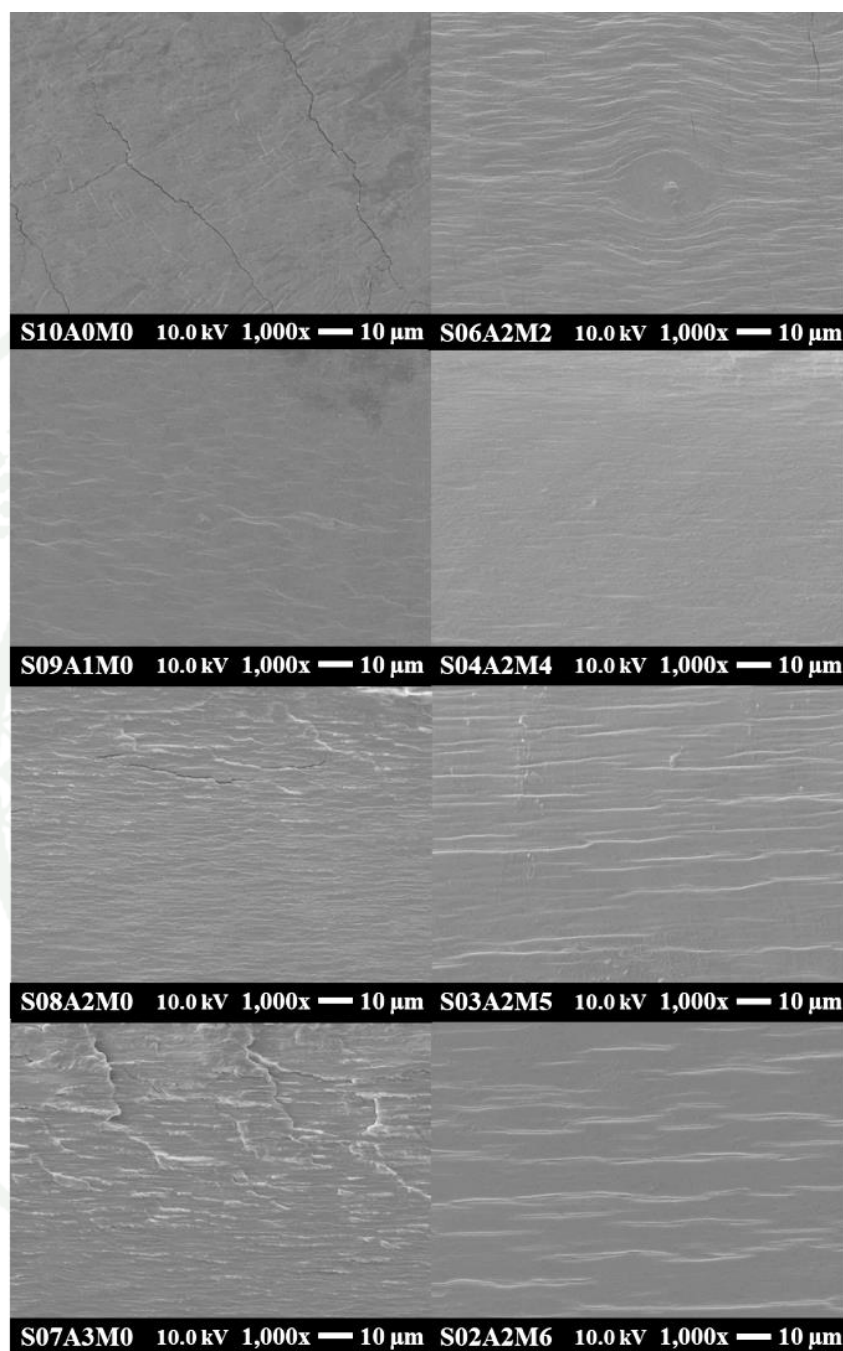
2.1 โครงสร้างจุลภาค

ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวฟิล์มและภาคตัดขวางที่มีอัตราส่วนของสตาร์ซ (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) แตกต่างกัน ภาพที่ 9 ก พบว่า ฟิล์มสตาร์ซ (S10A0M0) มีพื้นผิวที่เรียบ แต่เมื่อเติมอาการ์ (ร้อยละ 10-30) ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอาการ์ ซึ่งอาจเนื่องจากการเกาะกลุ่มเป็นก้อนของอาการ์ ทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน บ่งชี้ว่าการเติมอาการ์ในปริมาณมากขึ้นอาจส่งผลให้ความสามารถในการหลอมเหลวของอาการ์เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เช่นเดียวกับ Rocha et al. (2018) พบว่า พื้นผิวของฟิล์มอาการ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อสารละลายเกิดการเกาะกลุ่มของอาการ์ ฟิล์มสตาร์ซที่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน (ร้อยละ 20-60) จะมีอาการ์อยู่ร้อยละ 20 จึงทำให้พบความขรุขระของพื้นผิว เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอาการ์ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินจะทำให้พื้นผิวของฟิล์มเรียบขึ้น ซึ่งบ่งชี้ความเข้ากันของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน (Zhang et al., 2019)

ภาคตัดขวางที่แสดงในภาพที่ 9 ข. พบว่าฟิล์มสตาร์ซ (S10A0M0) มีโครงสร้างเรียบ เมื่อเติมอาการ์มีรอย (fracture) เกิดขึ้นจำนวนมากตามปริมาณอาการ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของโครงร่าง (non-homogeneous networks) ซึ่งสอดคล้องกับ (Wu, Geng, Chang, Yu & Ma, 2009) พบว่า ฟิล์มสตาร์ซมันฝรั่งมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของอาการ์ (ร้อยละ 15-30) ดังนั้นการเติมอาการ์ควรเติมในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันของเมทริกซ์ อย่างไรก็ตามการเติมมอลโทเดกซ์ทรินจะทำให้เกิดริ้วของโครงสร้าง เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินดูดซับน้ำได้ดีจึงทำให้มีน้ำในระบบเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการระเหยด้วยการอบแห้ง โครงสร้างมีการหดตัวจึงเกิดเป็นริ้วใน โครงสร้างฟิล์มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของมอลโทเดกซ์ทริน



(n)



(ข)

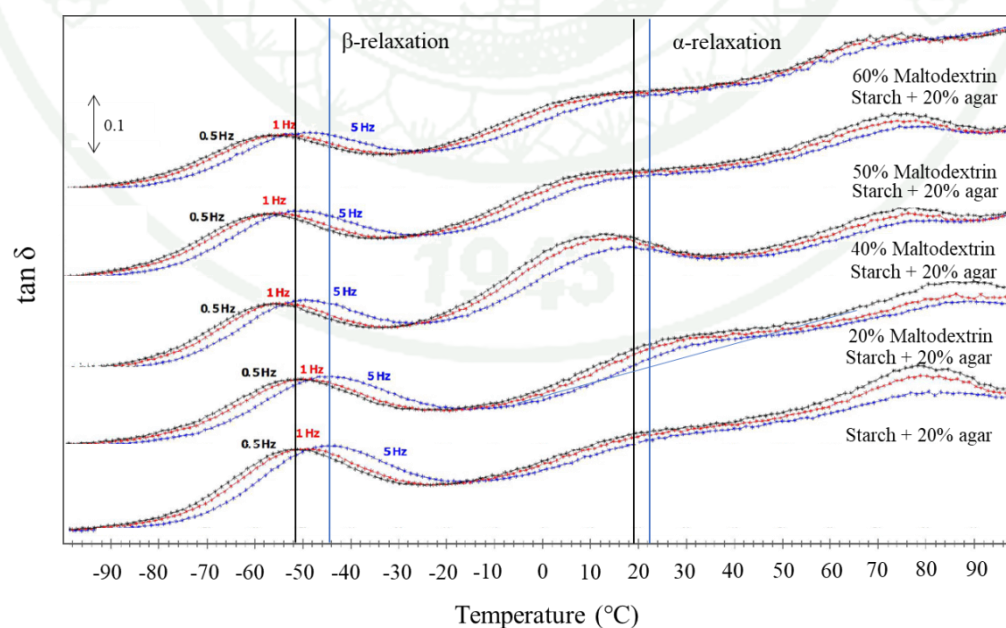
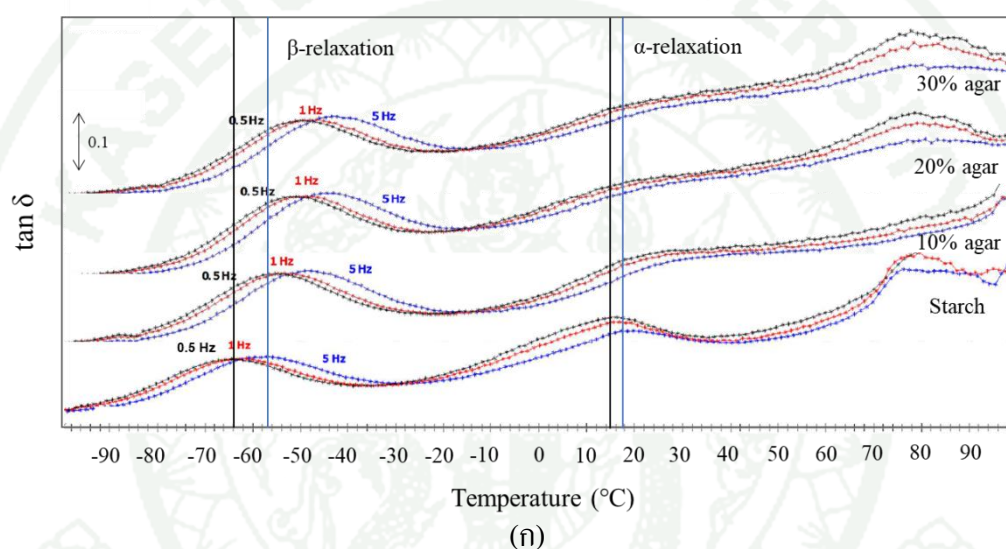
ภาพที่ 9 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของ (ก) พื้นผิว และ (ข) ภาควัดขวาง (cross section) ของฟิล์มโดยมีอัตราส่วนของสตาร์ซ (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ที่แตกต่างกัน

2.2 สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis)

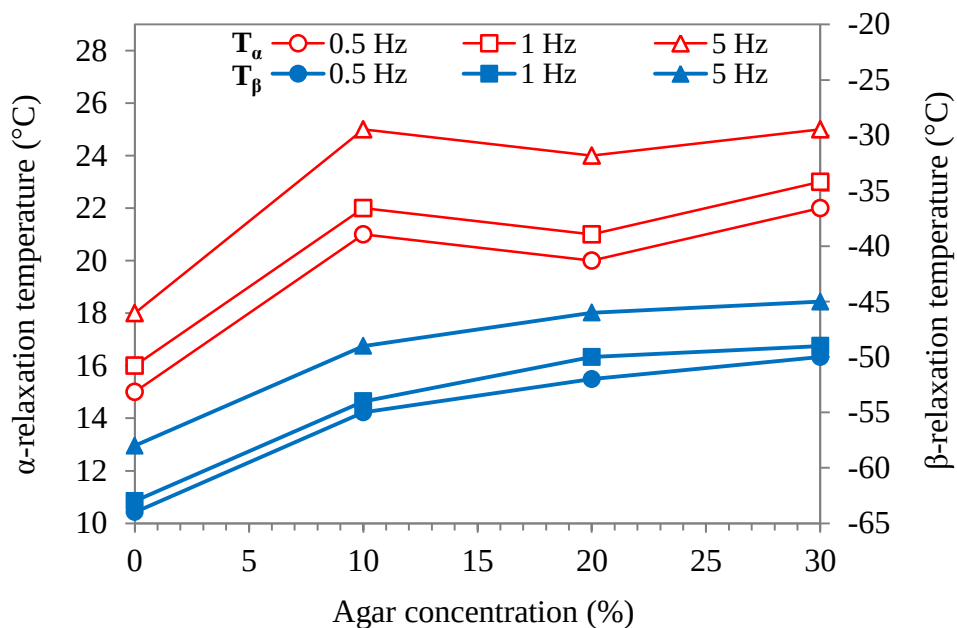
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสเชิงกลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ภาพที่ 10) แสดงด้วยค่า $\tan \delta$ ที่มาจากสัดส่วนระหว่างค่ามอดูลัสสะสม (E') และค่ามอดูลัสสูญเสีย (E'') ใช้อธิบายอุณหภูมิในการคลายตัวของวัสดุหรือรีแลกเซชัน (relaxation temperature) จากจุดยอดของ $\tan \delta$ โดยอุณหภูมิในการคลายตัวของวัสดุเกี่ยวข้องกับสภาพการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ซึ่งแบ่งเป็นการเกิดการคลายตัวที่เหนืออุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) และการคลายตัวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว หรือเรียกว่า แอลฟา-รีแลกเซชัน (α -relaxation) และเบต้า-รีแลกเซชัน (β -relaxation) ตามลำดับ (ณัฐดนัย, 2562) ภาพที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\tan \delta$ และอุณหภูมิ ภายใต้การวิเคราะห์ที่สามความถี่ คือ 0.5, 1.0 และ 5.0 เฮิรตซ์ พบว่า มีจุดยอด $\tan \delta$ ปรากฏอยู่ 2 ตำแหน่งในทุกระบบ ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิ β -relaxation (T_β) ที่อุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับเฟสของกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ และ α -relaxation (T_α) ที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของสตาร์ช ซึ่งสอดคล้องกับ Nguyen Vu & Lumdubwong (2016) ที่ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของการพลาสติกไซเซชันระหว่างพลาสติกไซเซอร์และสตาร์ช พบว่า กลีเซอรอลจะมีค่า T_g ที่ประมาณ - 58.5 องศาเซลเซียส และสตาร์ชมันสำปะหลังจะมีค่า T_g เท่ากับ 13.60 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงที่สองนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช ชนิดของพลาสติกไซเซอร์และอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและพลาสติกไซเซอร์ นอกจากนี้ การผสมระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินมีความเข้ากันได้ดี เนื่องจากอุณหภูมิในการคลายตัวของวัสดุมีเกิดขึ้นเพียงจุดเดียว (ช่วงที่สอง) ซึ่งอุณหภูมิในการคลายตัวของวัสดุนั้นจะเป็นตัวบ่งชี้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ (Motedayen, Khodaiyan & Salehi, 2013) นอกจากนี้พบการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสูญเสียความชื้นจากความร้อนของฟิล์ม

ผลของการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (ภาพที่ 10) พบว่า เมื่อเติมอาการ์ร้อยละ 10 ค่า T_α และ T_β เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสตาร์ช (S10A0M0) เนื่องจากอาการ์เกิดอันตรกิริยากับกลีเซอรอลทำให้ลดการเกิดพลาสติกไซเซชันของเมทริกซ์สตาร์ชส่งผลให้ค่า T_β เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอาการ์และสตาร์ชทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่า T_α เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณอาการ์ (ร้อยละ 10-30) ส่งผลให้ค่า T_β และ T_α เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ภาพที่ 10 เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินจะทำให้ค่า T_α และ T_β ลดลงซึ่ง

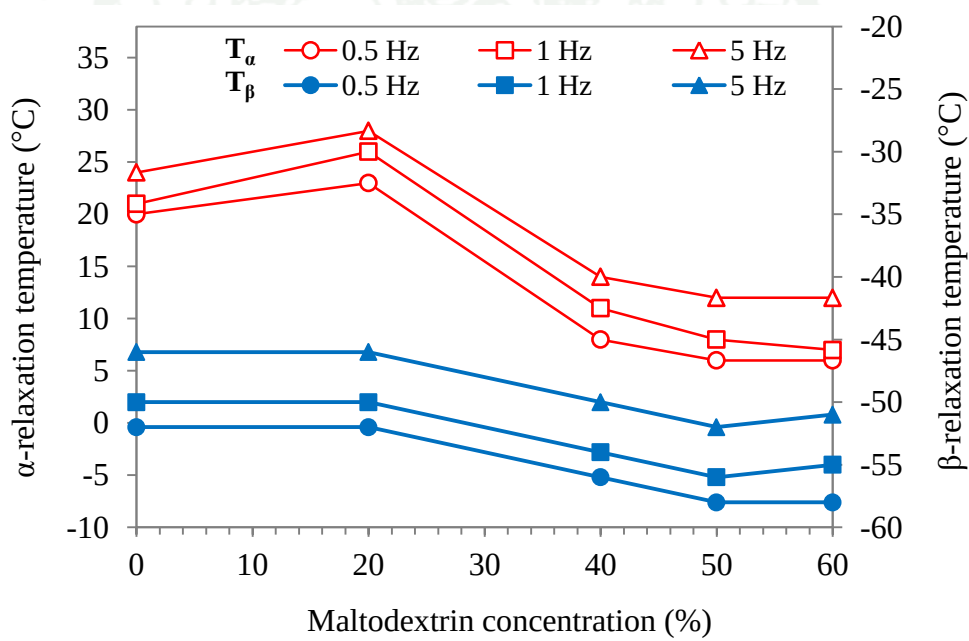
สามารถเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 40 เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีขนาดเล็ก ดูดซับน้ำได้ดี เมื่อเติมในสตาร์ชจึงทำให้เกิดพลาสติกไซเซชันมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า T_α และ T_β ลดลง นอกจากนี้การเพิ่มความถี่จะทำให้ค่า $\tan \delta$ มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากจะทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อได้รับแรงมากขึ้น Xie, Yu, Chen & Li (2008) บ่งชี้ว่าเมื่อวัสดุได้รับความถี่ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ความถี่สูงจะทำให้วัสดุที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น (elastic) จึงทำให้ค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่มากกว่าที่ความถี่ต่ำ



(ข)



(ก)



(ง)

ภาพที่ 10 สมบัติเชิงกลพลวัตที่ความถี่ คือ 0.5, 1 และ 5 เฮิรตซ์ของฟิล์มสตาร์ชที่มีการเติมอาหารและมอลโทเดกซ์ทรินในอัตราส่วนที่ต่างกัน (ก) $\tan \delta$ ของฟิล์มสตาร์ชที่เติมอาหารร้อยละ 10 ถึง 30 (ข) $\tan \delta$ ของฟิล์มสตาร์ชที่เติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 ถึง 60 โดยมีอาหารอยู่ร้อยละ 20 (ค) และ (ง) อุณหภูมิในการคลายตัวของวัสดุ (relaxation temperature) เมื่อมีการเติมอาหารและมอลโทเดกซ์ทริน ตามลำดับ

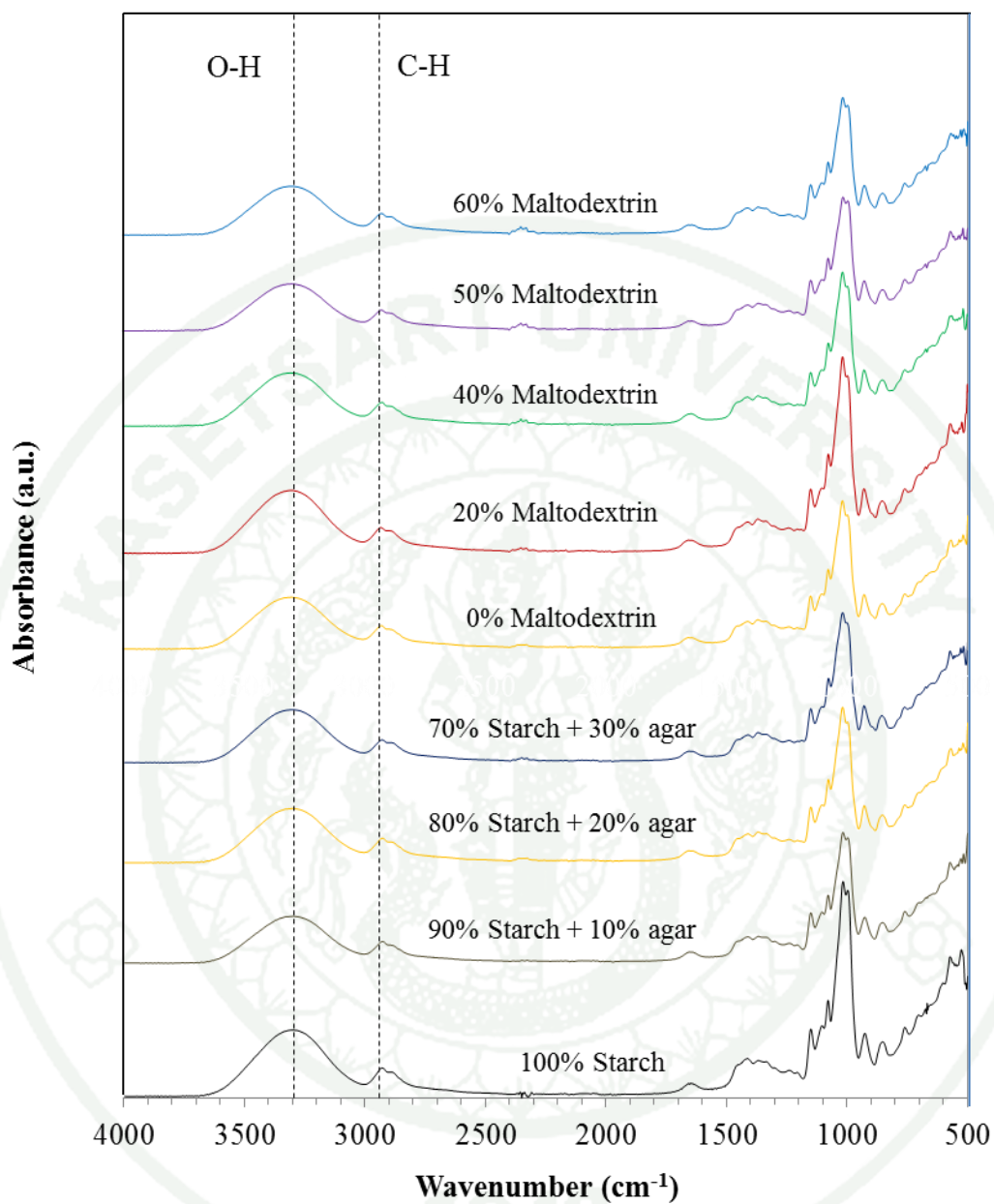
2.3 สเปกตรัมอินฟราเรด

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยรังสีอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) แสดงในภาพที่ 11 ในช่วง $700\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ มีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสูงสุดที่ตำแหน่ง 1018 และ 997 cm^{-1} ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเอมิโลสและอะไมโลเพกติน ตามลำดับ (Kuhnen et al., 2010) การดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่น 1018 cm^{-1} เกี่ยวกับการสั่นของ C-O-H และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสันฐานและผลึกของเม็ดสตาร์ช การดูดกลืนที่ 1080 และ 1150 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับการจับกันของการยืด (stretching) การงอ (bending) ของพันธะ C-O, C-C, O-H และการบิดแบบไม่สมมาตรของการเชื่อมไกลโคซิดิกของ C-O-C การดูดซับรังสีที่เลขคลื่น 1150 , 1080 และ 1018 cm^{-1} เกิดขึ้นระหว่างการเกิดเจลไดโนสเป็นการบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่และเกลียวของสตาร์ชเมื่อสูญเสียการจัดเรียงตัวและโครงสร้างผลึก (Liu, Charlet, Yelle & Arul, 2002; Soest, Tournois, Wit & Vliegenthart, 1995)

การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในโครงสร้างของสตาร์ชหลังจากเติมพอลิแซ็กคาไรด์ (อาการ์ และ/หรือมอลโทเดกซ์ทริน) นั้นสามารถสังเกตได้ในช่วง $700\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ ได้อย่างชัดเจน โดยพบว่าเมื่อเติมพอลิแซ็กคาไรด์ความเข้มข้นของการดูดซับอินฟราเรดลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิแซ็กคาไรด์นั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย Zhang et al. (2019) รายงานว่าที่เลขคลื่น 1077 , 1018 และ 926 cm^{-1} เป็นพีคที่บ่งบอกถึงการยืดของ C-O สำหรับ 3,6-anhydrogalactose ซึ่งเป็นพันธะของอาการ์ เมื่อเพิ่มปริมาณอาการ์จากร้อยละ 10 ถึง 30 ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสเปกตรัมทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณของอาการ์พร้อมทั้งการลดปริมาณของสตาร์ชทำให้พีคที่ปรากฏไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง บ่งชี้ว่าอาการ์สร้างโครงร่างต่อเนื่องซึ่งเป็นส่วนสำคัญของสมบัติฟิล์ม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาฟิล์มที่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน (ร้อยละ 20 ถึง 60) จะมีความเข้มข้นของการดูดซับรังสีอินฟราเรดลดลงตามสัดส่วนเมื่อมอลโทเดกซ์ทรินเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงบทบาทของสารเติมในโครงร่างต่อเนื่องของสตาร์ชและอาการ์

การดูดซับอินฟราเรดในช่วง $3000\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการยืดของ O-H ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นทั้งพันธะอิสระ (free) ภายใน (intra) และระหว่าง (inter) โมเลกุล (Wu et al, 2009) จากภาพที่ 11 พบว่าเมื่อเติมพอลิแซ็กคาไรด์ทำให้ของการดูดซับอินฟราเรดในช่วง $3000\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ ลดลง ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเติมอาการ์ร้อยละ 10 สอดคล้องกับ Nagar et al. (2019) ทำการศึกษาการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ประกอบด้วยอาการ์และแซนแทนกัม ใน

ฟิล์มมันฝรั่ง พบว่า ที่เลขคลื่นประมาณ 3300 cm^{-1} มีการดูดซับอินฟราเรดลดลงเมื่อเติมไฮโดรคอลลอยด์ เนื่องจากการจับกันระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลไฮดรอกซิลจึงเป็นเหตุให้ความสามารถในการเกิดการยืดของ O-H ที่เกี่ยวข้องกับพันธะไฮโดรเจนทั้งพันธะภายในและระหว่างโมเลกุลลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณอาหารไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้ม นอกจากนี้ที่เลขคลื่น 2930 cm^{-1} (เกี่ยวข้องกับการยืดของ C-H) มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการเปลี่ยนตำแหน่งจุดยอด (shift) ไปยังเลขคลื่นที่น้อยกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอาหารบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของการเกิดอันตรกิริยา เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินความเข้มข้นการดูดกลืนนั้นมีลักษณะเหมือนกันกับการเติมอาหาร ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าพอลิแซ็กคาไรด์ทำให้ความเข้มข้นของการดูดกลืนที่พันธะไฮโดรเจนนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง



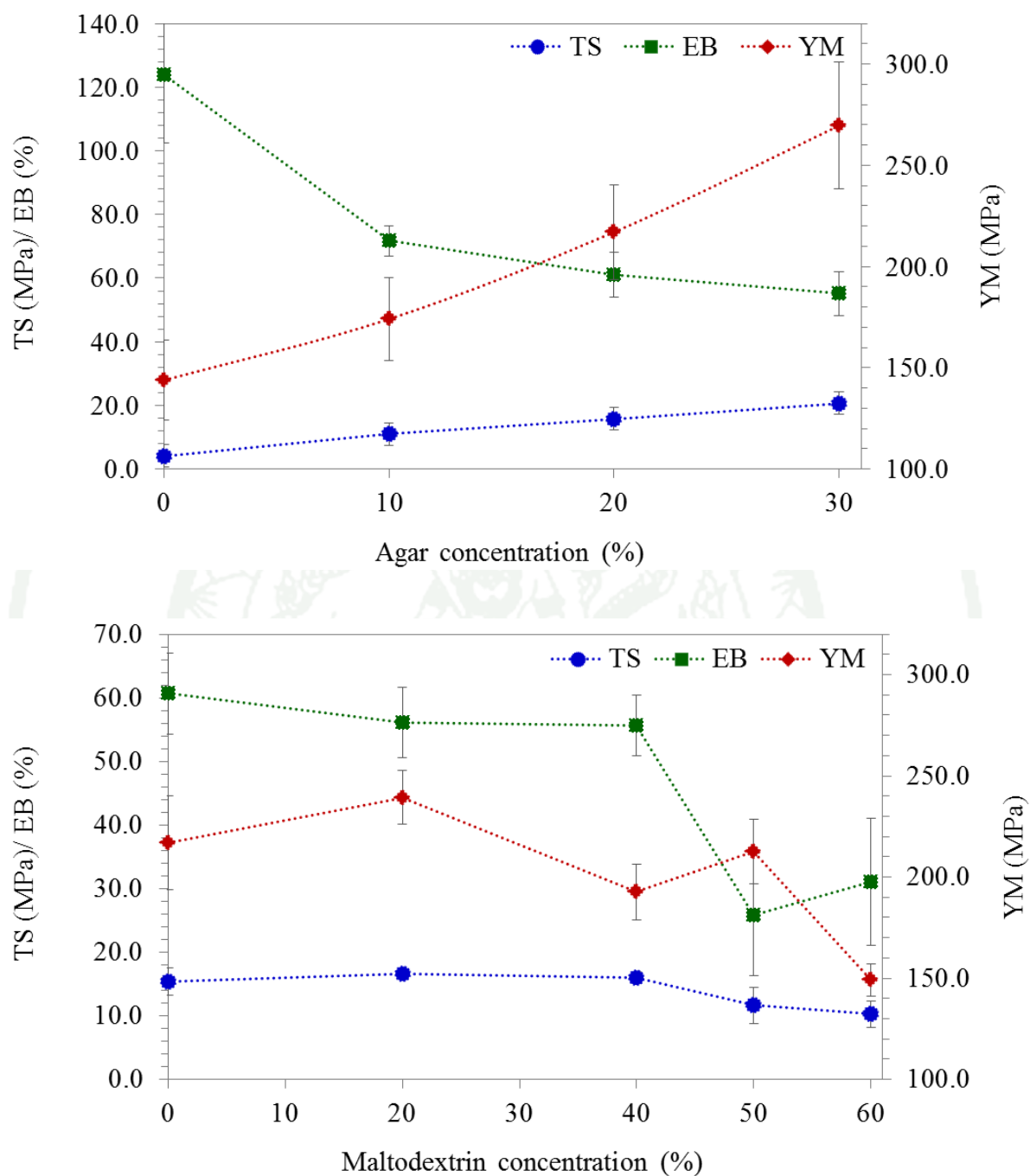
ภาพที่ 11 สเปกตรัมอินฟราเรดของของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินแตกต่างกัน ได้แก่ อาการ์ร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาการ์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาการ์ร้อยละ 20

2.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม

การทดสอบแรงดึง (tensile testing) ของฟิล์ม (ภาพที่ 12) พบว่าฟิล์มสตาร์ชที่มีการเติมอาหารส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงข้ามปริมาณอาหารที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยืดตัว (elongation at break) ลดลง เนื่องจากอาหารมีโครงร่างที่แข็ง (rigid network) เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงกว่าสตาร์ชจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น โครงสร้างของอาหารประกอบด้วย D-galactopyranose และ 3,6-anhydro-L-galactopyranose โดยจะมีการเชื่อมกันด้วย α -(1,4) และ β -(1,3) ซึ่งแตกต่างกับสตาร์ชที่มีโครงสร้างของ α -D-glucopyranosyl แอมิโลสและอะไมโลเพกติน เชื่อมด้วย α -(1,4) glycosidic และ α -(1,6) จึงทำให้อันตรกิริยาภายในและภายนอกของสตาร์ชนั้นน้อยกว่าอาหาร (Phan, Debaufort, Luu & Voilley, 2005) โครงร่างที่แข็งของอาหารทำหน้าที่ในการลดความยืดหยุ่น (flexibility) และเพิ่มความแข็งเปราะ (stiffness) ของฟิล์ม ซึ่งสอดคล้องกับ Wu et al. (2009) ที่ทำการศึกษาการเติมอาหารร้อยละ 0 ถึง 30 ในสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นและค่าการยืดตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอาหาร เป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลสตาร์ชและอาหาร มีการเกิดโครงร่างสามมิติของอาหารที่เกิดจากการพันกันของสายโซ่ตามปริมาณอาหารที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะไปยับยั้งการเคลื่อนที่ (mobility) ของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์ส่งผลให้ความสามารถดึงยึดลดลง จากภาพที่ 5ก พบว่าเมื่อเติมอาหารร้อยละ 30 ทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 5 เท่า (จาก 4.31 MPa เป็น 20.66 MPa) และร้อยละการยืดตัวลดลง 2 เท่า (จากร้อยละ 123.68 เป็นร้อยละ 55.09) โดยการเพิ่มขึ้นของค่าการต้านทานแรงดึงและการลดลงของค่าแรงดึงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณอาหารนั้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรงและเอกซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มที่มีการเติมอาหารนั้นมีผลสอดคล้องกับ FTIR ที่มีการเกิดโครงร่างที่ต่อเนื่องของอาหารซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อสมบัติของฟิล์ม อีกทั้ง DMTA ยังรายงานว่าเมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอาหารแล้วจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ส่งผลให้อุณหภูมิ T_g เพิ่มขึ้น

ในทางตรงกันข้ามเมื่อฟิล์มสตาร์ชมีการเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 ถึง 60 (ภาพที่ 12 ข) จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลงและลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 50 เช่นเดียวกับการดึงยึดของฟิล์มจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 50 จะทำให้ค่าการดึงยึดลดลง สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทรินมีแนวโน้มลดลง

เป็นผลมาจากการเกิดพลาสติกไซเซชันโดยมอลโทเดกซ์ทรินที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุลน้อย อีกทั้งมอลโทเดกซ์ทรินไม่สามารถสร้างการเชื่อมต่อของโครงร่างทำให้สมบัติเชิงกลลดลงจึงทำให้มอลโทเดกซ์ทรินทำหน้าที่เป็นสารเติมเพื่อลดความแข็งแรงให้วัสดุผสม นอกจากนี้มอลโทเดกซ์ทรินยังมีสมบัติในการดูดน้ำสูงจึงส่งผลต่อการเกิดพลาสติกไซเซชัน การเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 ถึง 40 แสดงให้เห็นว่าอากรที่มีอยู่ร้อยละ 20 นั้นทำหน้าที่สำคัญต่อสมบัติของฟิล์มโดยค่าความต้านทานแรงดึงและการดึงยืดยังมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับ Galus et al. (2012) ที่ได้รายงานว่าการเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 ในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองนั้นค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดของฟิล์มนั้นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณของมอลโทเดกซ์ทรินพร้อมทั้งการลดปริมาณสตาร์ชนั้นจะทำให้สมบัติความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มลดลง การเติมมอลโทเดกซ์ทรินมากกว่าร้อยละ 40 อาจไปขัดขวางการสร้างโครงร่างของอากรจึงส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มนั้นลดลงอย่างชัดเจน จากผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพบว่าปริมาณอากรที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการพันกันของโครงร่างสามมิติซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลในขณะที่มอลโทเดกซ์ทรินทำหน้าที่เป็นสารเติมทำให้สมบัติเชิงกลลดลง



ภาพที่ 12 สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง (tensile strength, TS) การดึงยืด (elongation at break, EB) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus, YM) ของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาหารและมอลโทเดกซ์ทรินแตกต่างกัน ได้แก่ อาหารร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาหารร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาหารร้อยละ 20

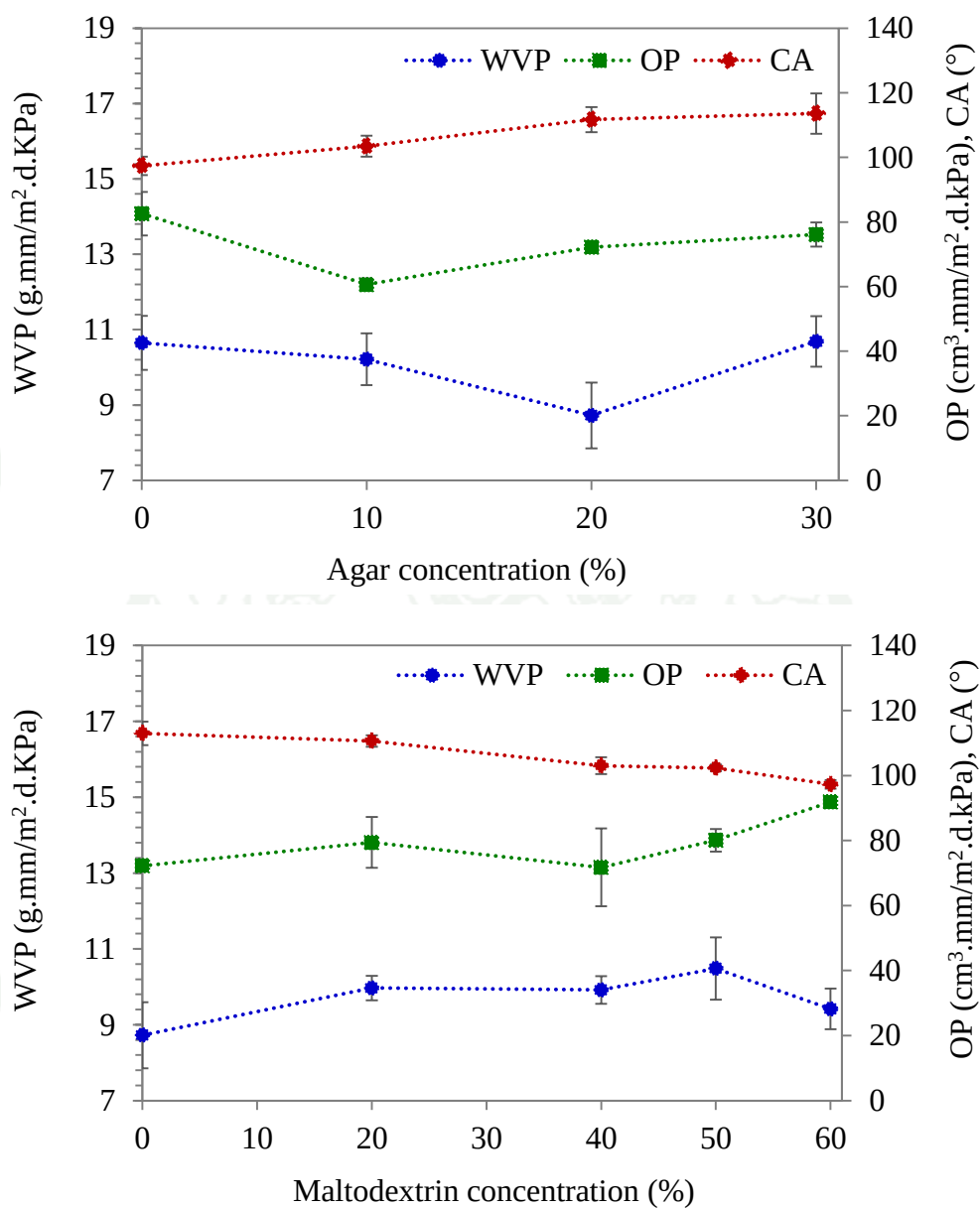
2.5 สมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (barrier property)

ภาพที่ 13 แสดงค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability, WVP) สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (oxygen permeability, OP) และมุมสัมผัสน้ำ (water contact angle, CA) ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำของฟิล์มบริโกลได้เป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการอธิบายถึงลักษณะพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (surface hydrophobicity) ใช้ในการประเมินสมบัติความเปียก (wettability) จากภาพที่ 13 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอาคารจะทำให้ค่ามุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้น (97° ถึง 114°) เป็นการบ่งชี้ว่าการเติมอาคารจะช่วยเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับพื้นผิวของฟิล์ม เนื่องจากอาคารเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ละลายน้ำแต่จะเกิดการพองตัวที่อุณหภูมิห้องทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณอาคารพร้อมทั้งลดปริมาณสตาร์ชจะมีค่ามุมสัมผัสที่สูงขึ้น ตรงข้ามกับการเติมมอลโทเดกซ์ทรินที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสน้ำลดลง (112° ถึง 97°) เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีความชอบน้ำมาก (hydrophilicity) จึงดูดน้ำสูง สามารถละลายน้ำได้ดีจึงส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน ทำให้ความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวลดลง

สภาพให้ซึมผ่านได้ (permeability) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการบ่งชี้อายุการเก็บรักษาและความสามารถในการบรรจุของฟิล์ม ขึ้นกับการละลาย (solubility) และการแพร่ (diffusion) ของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ผ่านฟิล์ม สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำอธิบายได้โดยกลไกการดูดซับ (absorption) ที่พื้นผิวฟิล์ม การแพร่ผ่านชั้นบางของฟิล์ม และกลไกการปลดปล่อยไอน้ำจากพื้นผิวของฟิล์ม (da Rocha et al., 2018; Gaudin, Lourdin, Forssell & Colonna, 2000) จากภาพที่ 13 พบว่า ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลงเมื่อเติมอาคาร เนื่องจากอาคารช่วยเพิ่มความไม่ชอบน้ำ (สอดคล้องกับผลค่ามุมสัมผัสน้ำ) และสมบัติการดูดซับน้ำได้ดีของอาคารซึ่งอาคารพองตัวเมื่อดูดซับน้ำ นอกจากนี้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการแพร่ผ่านของฟิล์ม โดยพอลิเมอร์ภายในสถานะคล้ายแก้วหรือมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วสูงจะมีสภาพการเคลื่อนที่น้อย นอกจากนี้วัสดุที่มีอุณหภูมิรีแลกเซชันสูงบ่งชี้ปริมาณอิสระ (free volume) ต่ำ ซึ่งชะลอการเคลื่อนที่ของสารผ่านฟิล์มทำให้สภาพการซึมผ่านได้ลดลง (Gaudin et al., 2000; ณัฐคนัย, 2662) สอดคล้องกับผล DMTA (ภาพที่ 10) ที่แสดงว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอาคารจะทำให้อุณหภูมิรีแลกเซชันเพิ่มสูงขึ้นบ่งชี้สภาพการเคลื่อนที่ของสายโซ่ลดลงเนื่องจากการลดลงของปริมาณอิสระและช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลง มีโครงสร้างเรียงตัวชิดกันทำให้ขัดขวางการแพร่ผ่านของโมเลกุลไอน้ำ สภาพให้ซึมผ่านจึงลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณอาคารร้อยละ 30 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงสร้างวัสดุทำให้เกิด

การแพร่ของไอน้ำเพิ่มขึ้น ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 9) ของ S07A3M0 แสดงการแยกชั้นในเมทริกซ์ของฟิล์ม Harnkarnsujarit & Li (2017) พบการแยกชั้นเมื่อมีปริมาณอากาศสูงในฟิล์มผสมทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้สูงขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินเพิ่มความชอบน้ำและสมบัติการดูดซับน้ำ (สอดคล้องกับผลค่ามุมสัมผัสน้ำ) อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน (ร้อยละ 20-60) พร้อมทั้งลดปริมาณสตาร์ชทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสำหรับฟิล์มผสมสตาร์ช อากาศ และมอลโทเดกซ์ทรินเป็นผลจากอากาศเป็นหลัก

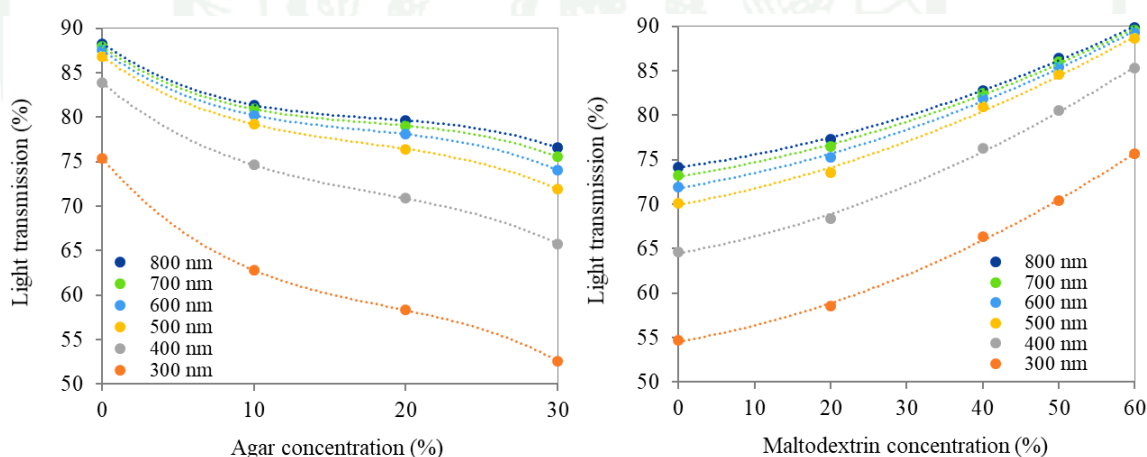
สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลงเมื่อเติมอากาศ (ภาพที่ 13) เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและอากาศ ทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านเพิ่มขึ้น Wu et al. (2009) พบว่า เมื่อเติมอากาศร้อยละ 5-10 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนลดลงเนื่องจากมีการก่อตัวของโครงสร้างร่างแหสามมิติที่แน่นจึงลดช่องว่างของปริมาตรอิสระการแพร่ผ่านจึงมีค่าลดลง การเกิดรูและรอยแตกของเมทริกซ์ทำให้การแพร่ผ่านเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ (ร้อยละ 20-30) สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอากาศไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจึงทำให้ค่าสภาพให้ซึมผ่านเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม (ภาพที่ 2) แสดงการแยกชั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ ทำให้การแพร่ของแก๊สออกซิเจนมากขึ้น Zhang et al. (2019) รายงานว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาค ปริมาตรช่องว่าง การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ความมีขั้วของเมทริกซ์ ซึ่งทำให้เกิดปริมาตรอิสระและเร่งให้เกิดการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน นอกจากนี้เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินคาดว่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนจะลดลงเนื่องจาก การเติมมอลโทเดกซ์ทรินเพิ่มคุณสมบัติการชอบน้ำและความมีขั้วให้กับวัสดุ อย่างไรก็ตามการเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 0-40 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 50-60 ทำให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนมีค่าสูงขึ้น มอลโทเดกซ์ทรินทำให้เกิดพลาสติกไซเซชัน และลดอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (ภาพที่ 9) เป็นสาเหตุให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่และช่องว่างระหว่างโมเลกุลจากปริมาตรอิสระของเมทริกซ์เพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่ผ่านมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 13 สมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (barrier property) ประกอบด้วย ประกอบด้วยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability, WVP) ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (oxygen permeability, OP) และค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (water contact angle, CA) ของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาร์และมอลโทเดกซ์ทรินแตกต่างกัน ได้แก่ อาร์ร้อยละ 0 (สตาร์ชร้อยละ 100) อาร์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาร์ร้อยละ 20

2.6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

ค่าการส่องผ่านของแสง (light transmittance) เป็นสมบัติที่สำคัญในการป้องกันแสงและบ่งบอกถึงลักษณะปรากฏของฟิล์มและบรรจุภัณฑ์บริโภคได้ นอกจากนี้การส่องผ่านของแสงสามารถบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้ขององค์ประกอบ (Zhang et al., 2013a) ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่มีต่อร้อยละการส่องผ่านของแสงพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอาการ์จะทำให้ร้อยละการส่องผ่านของแสงมีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณอาการ์เพิ่มขึ้นการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่แน่นขึ้นและการรวมกลุ่มกันของอาการ์จึงทำให้ร้อยละการส่องผ่านของแสงลดลง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณอาการ์จะทำให้การส่องผ่านของแสงลดลงเพราะเกิดการเกาะกลุ่มของอาการ์ขัดขวางการส่องผ่านของแสง ในขณะที่เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินพบว่า ร้อยละการส่องผ่านของแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีขนาดโมเลกุลเล็กจึงทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์เกิดพลาสติกไซเซชัน มีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีลักษณะใสมากขึ้น

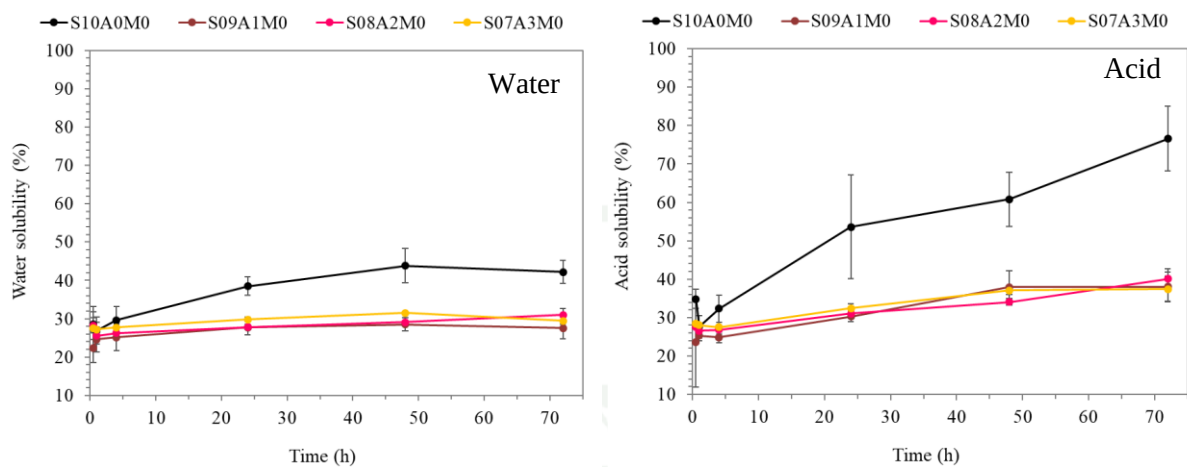


ภาพที่ 14 การส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน (300-800 nm) โดยมีปริมาณอาการ์ร้อยละ 0-30 และมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 0-60

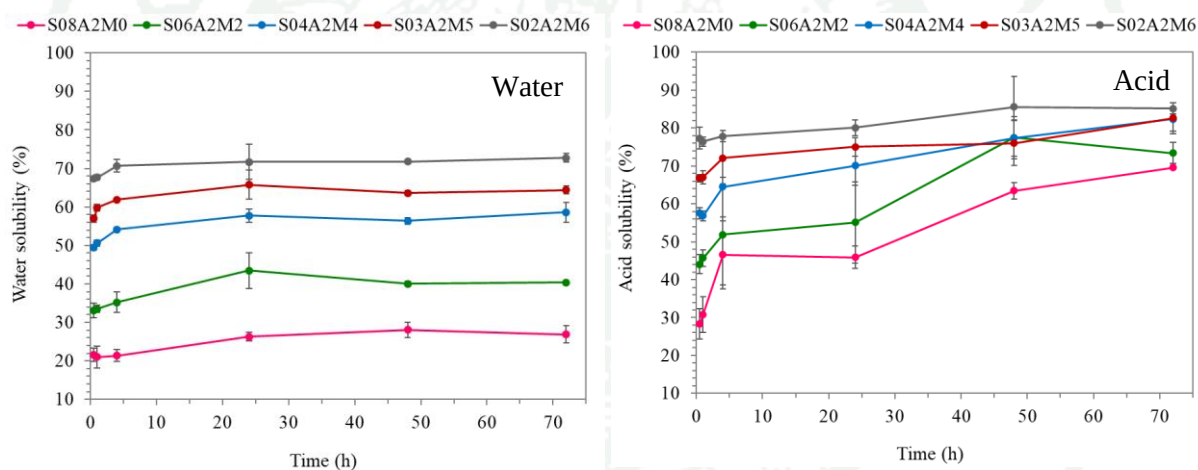
2.7 การละลายของฟิล์ม

การละลายของฟิล์มบรีโกลได้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการกำกับพฤติกรรมการปลดปล่อยของเปลือกแคปซูล สภาพการละลายน้ำและกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) ของฟิล์มเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นแสดงดัง ภาพที่ 15 ร้อยละการละลายของฟิล์มสตาร์ชเข้าสู่สมดุล (ร้อยละ 44) ที่เวลา 48 ชั่วโมง ในขณะที่การละลายน้ำของฟิล์มลดลงเมื่อเติมอาหารเนื่องจากอาหารมีโครงสร้างที่แข็งแรง มีความไม่ชอบน้ำ ดูดซับน้ำและไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำแต่มีการพองตัว อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณอาหารเพิ่มขึ้นร้อยละการละลายน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อเติมอาหารร้อยละ 10-30 อันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอาหารไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งแสดงด้วย FTIR สอดคล้องกับ Garrido, Etxabide, Guerrero & Caba (2016) ศึกษาการละลายของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง พบว่า การละลายลดลงเมื่อมีการทำงานร่วมกันระหว่างอาหารและโปรตีนถั่วเหลือง นอกจากนี้เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินจะทำให้สภาพการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของมอลโทเดกซ์ทริน เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีสมบัติชอบน้ำและสามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง การเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินจึงเร่งการละลายของวัสดุ (Parikh, Agarwal & Raut, 2014)

สภาพการละลายของฟิล์มในกรดไฮโดรคลอริก pH=1 เป็นการจำลองสภาวะกระเพาะอาหาร (ภาพที่ 15ข) แนวโน้มการละลายคล้ายคลึงกับการละลายน้ำ แต่ร้อยละการละลายในกรดจะมีค่าสูงกว่าการละลายน้ำ เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ช เนื่องจากการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิกในส่วนอสัณฐาน เกิดเป็นโมเลกุลสั้น (Betancur & Chel, 1997) ดังนั้นฟิล์มผสมระหว่างสตาร์ช อาหารและมอลโทเดกซ์ทรินมีสภาพการละลายในกรดดีกว่าในน้ำ โดยการเติมอาหารทำให้สภาพการละลายของฟิล์มในกรดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การละลายในน้ำ อาจเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอาหารมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับฟิล์มสตาร์ช (S10A0M0) และฟิล์มที่มีสัดส่วนของมอลโทเดกซ์ทริน (ร้อยละ 20-60) ที่มีสภาพการละลายเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ดังนั้นการเติมอาหารมีประสิทธิภาพในการควบคุมสภาพการละลาย ในขณะที่การเติมมอลโทเดกซ์ทรินมีประสิทธิภาพในการเร่งการละลายทั้งในน้ำและกรดของฟิล์มบรีโกลได้หรือบรจักษ์บรีโกลได้

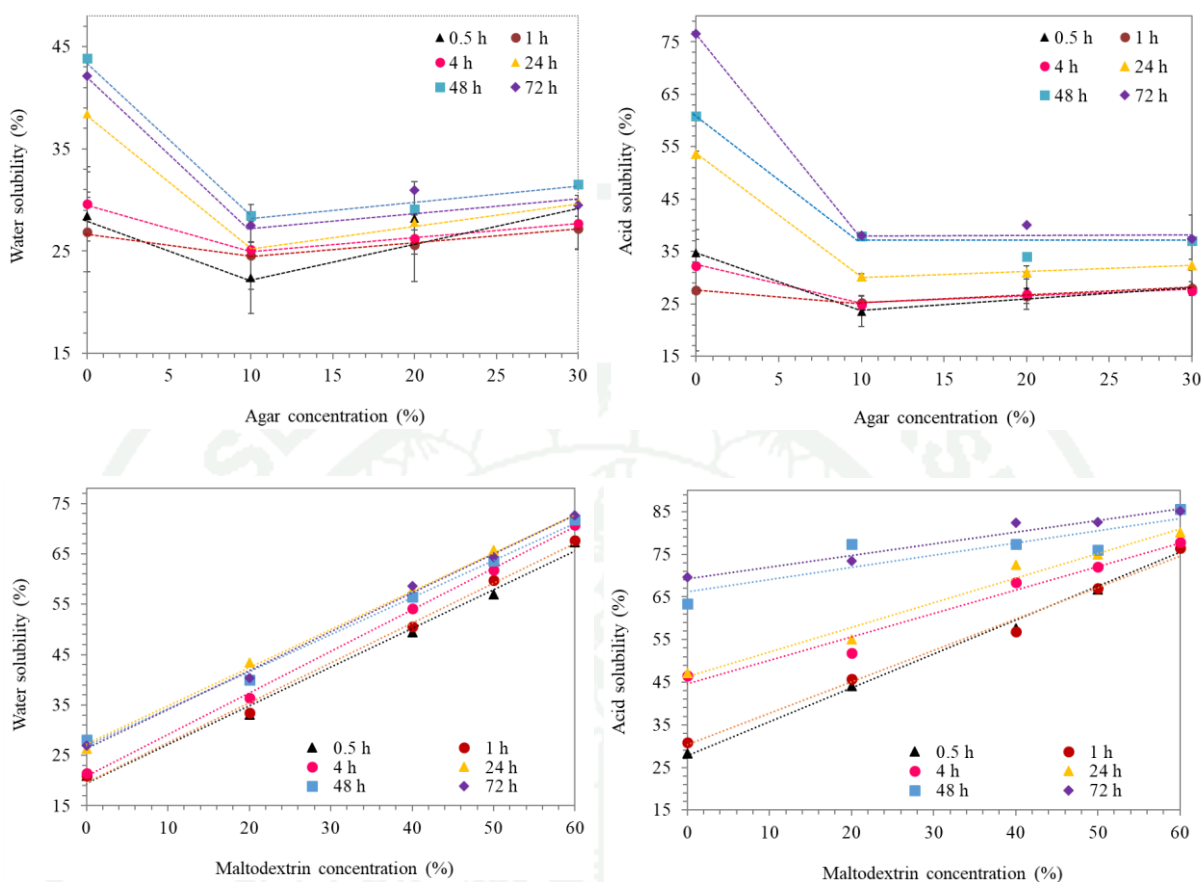


(ก)



(ข)

ภาพที่ 15 สภาพการละลายน้ำและกรด (HCl, pH=1) ของฟิล์มสตาร์ที่มีสัดส่วนของอาหาร (ก) และมอลโทเดกซ์ทรีน (ข) แตกต่างกันได้แก่ อาหารร้อยละ 0 (สตาร์ร้อยละ 100) อาหารร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยไม่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทรีน และมอลโทเดกซ์ทรีนร้อยละ 20, 40, 50 และ 60 ซึ่งมีอาหารร้อยละ 20 เมื่อเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 16 สภาพการละลายของฟิล์มในน้ำและกรด (HCl, pH=1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินและร้อยละการละลายเมื่อเวลาแตกต่างกัน

ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการละลายกับความเข้มข้นของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน เมื่อเติมอาการ์สภาพการละลายทั้งในน้ำและกรดลดลง การเพิ่มปริมาณอาการ์ร้อยละ 10-30 ทำให้ร้อยละการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่ขึ้นกับปริมาณอาการ์ ตรงข้ามกับการเติมมอลโทเดกซ์ทริน เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินสภาพการละลายในน้ำและกรดเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงตามสัดส่วนของมอลโทเดกซ์ทริน แสดงให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันระหว่างสตาร์ช-อาการ์ ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพการละลายของมอลโทเดกซ์ทริน เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและอาการ์สามารถควบคุมการละลาย (เมื่อเติมอาการ์สภาพการละลายลดลง) ดังนั้นการเติมอาการ์ส่งผลต่อการควบคุมสภาพการละลายของฟิล์มสตาร์ชและเมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินสภาพการละลายเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนและเวลาในการละลายของมอลโทเดกซ์ทริน

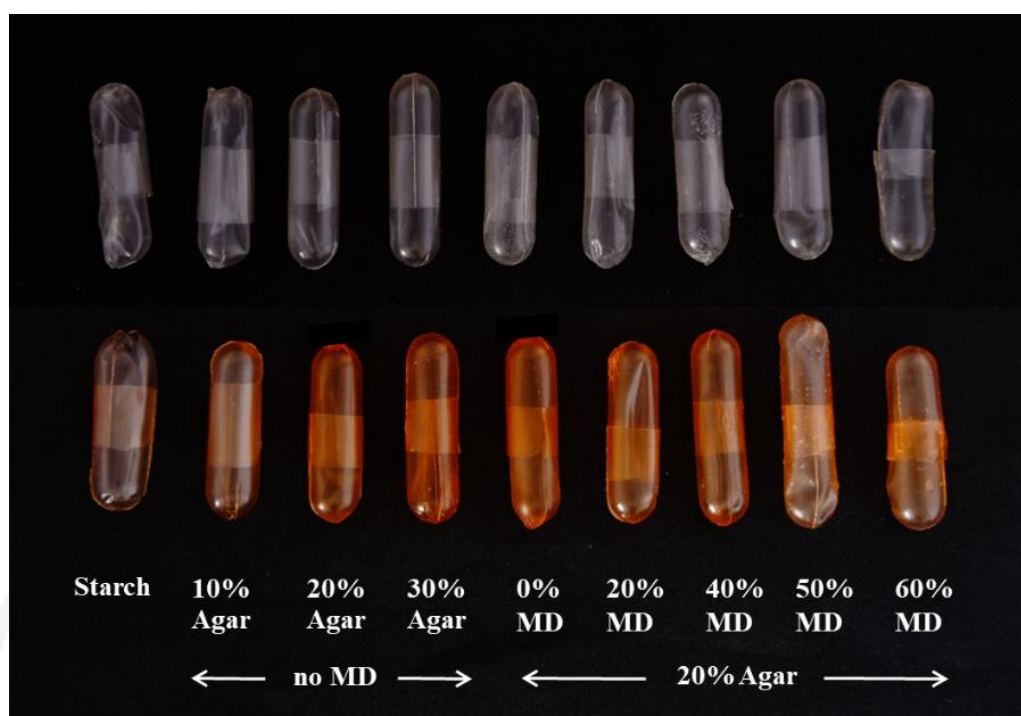
3. เปลือกแคปซูล

3.1 การขึ้นรูปเปลือกแคปซูล

การขึ้นรูปเปลือกแคปซูลด้วยวิธีการจุ่มแม่พิมพ์ในสารแขวนลอยผสมสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน พบว่า ระหว่างการจุ่มแม่พิมพ์ความสามารถในการเกาะติดของสารแขวนลอยมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอาการ์ทำให้การจุ่มเปลือกแคปซูลมีการเกาะติดที่สม่ำเสมอ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินความสามารถในการเกาะติดกับแม่พิมพ์ลดลงตามปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินที่เพิ่มขึ้นทำให้การเกาะติดไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย นอกจากนี้ลักษณะปรากฏของเปลือกแคปซูลชนิดแข็งหลังจากการแกะออกจากแม่พิมพ์ (ภาพที่ 17) พบว่า เปลือกแคปซูลที่มีการเติมอาการ์สามารถแกะออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างง่ายและมีความคงตัว การเพิ่มปริมาณอาการ์ทำให้สามารถขึ้นรูปเปลือกแคปซูลได้ดีขึ้น เปลือกแคปซูลมีลักษณะเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เปลือกแคปซูลสตาร์ช (S10A0M0) ความสามารถในการขึ้นรูปไม่สม่ำเสมอ เปลือกแคปซูลนิ่มและหดรัดตัวเนื่องจากสตาร์ชมีสมบัติชอบน้ำทำให้ดูดความชื้นจากสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับเปลือกแคปซูลที่มีการเติมมอลโทเดกซ์ทริน โดยเปลือกแคปซูลที่ได้มีลักษณะนิ่มหดรัดและความคงตัวต่ำตามปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินพร้อมทั้งลดปริมาณสตาร์ชไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของเปลือกแคปซูลอย่างมีนัยสำคัญ (ความหนาประมาณ 0.128-0.156 มิลลิเมตร) ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสารแขวนลอยที่ใช้ในการเตรียมเปลือกแคปซูลจากสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพผนวกที่ 1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินพร้อมทั้งลดปริมาณของสตาร์ชทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเอมิโลสลดลงและอาจเกิดจากเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและดูดซับน้ำลดลง (Sousa & Goncalves, 2015) ซึ่งขัดแย้งกับความสามารถในการขึ้นรูปของเปลือกแคปซูลที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอาการ์ความสามารถในการขึ้นรูปดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการขึ้นรูปเปลือกแคปซูลขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกิดเจลของอาการ์มากกว่าความหนืดของสารแขวนลอย ทั้งนี้อาการ์มีความสามารถในการเกิดเจลได้ดีทำให้พื้นผิวของเปลือกแคปซูลที่ได้เรียบตามแม่พิมพ์ ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน ความเรียบและความคงตัวของเปลือกแคปซูลลดลง เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีความชอบน้ำสูงจึงนำไปสู่การเกิดการหดรัดและรอยร่นของเปลือกแคปซูล ดังนั้นจากการศึกษาการขึ้นรูปของเปลือกแคปซูล พบว่า อาการ์ช่วยในการเพิ่มความคงรูปและความสามารถในการขึ้นรูปของ

บรรจุภัณฑ์บริโภคได้ นอกจากนี้ความสามารถในการขึ้นรูปของเปลือกแคปซูลไม่ได้ขึ้นกับความหนืดแต่ขึ้นอยู่กับการสร้างเจลของอาหาร ซึ่งยืนยันด้วยการวิเคราะห์หัตถยากระแสน้ำของของวัสดุผสมในสถานะของไหลที่อุณหภูมิต่ำ (ภาพที่ 8)

เมื่อนำเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกันโดยวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์มาเปรียบเทียบกับเปลือกแคปซูลชนิดแข็งที่ใช้ในเชิงการค้าซึ่งผลิตจากเจลาติน โดยทำการเปรียบเทียบความหนา ความสามารถในการละลายน้ำและกรดไฮโดรคลอริก pH=1 และความต้านทานแรงกด (compression) แสดงดังตารางผนวกที่ 2 พบว่าสมบัติของเปลือกแคปซูลชนิดแข็งเชิงการค้ามีสมบัติที่มากกว่าแคปซูลชนิดแข็งผสมที่ผลิตขึ้น อาจเนื่องมาจากกระบวนการและองค์ประกอบในการผลิตจึงทำให้เปลือกแคปซูลมีความหนา ความแข็งแรงและละลายได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเปลือกแคปซูลที่ผลิตจากสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกันนั้นสามารถนำไปใช้ในการควบคุมการละลายและการปล่อยยาตามเป้าหมายที่ต้องการได้ โดยอาจนำไปประยุกต์ใช้หรือเติมสารเติมแต่งเพื่อให้เปลือกแคปซูลที่ผลิตได้นั้นมีสมบัติเทียบเท่ากับเปลือกแคปซูลเชิงการค้าได้

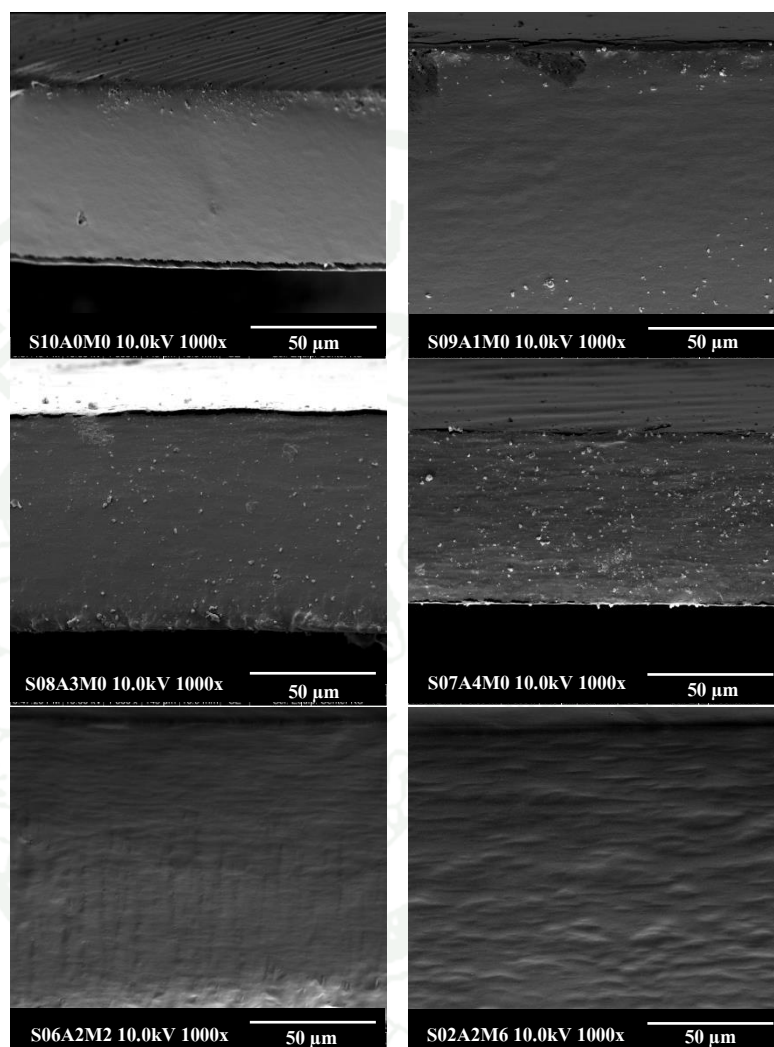


ภาพที่ 17 ลักษณะปรากฏของเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกัน โดยวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์

หมายเหตุ เปลือกแคปซูลสีส้ม (แถวล่าง) เป็นการเติมส่วนผสมอาหารเพื่อให้สามารถมองเห็นเปลือกแคปซูลได้ชัดเจนขึ้น

3.2 สันฐานวิทยาของเปลือกแคปซูล

ภาคตัดขวางของเปลือกแคปซูลส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่าเปลือกแคปซูลที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน โครงสร้างจัดเรียงตัวกันแน่น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของมอลโทเดกซ์ทรินจะทำให้โครงสร้างเกิดรอยร้าวซึ่งอาจเกิดการการดูดซับความชื้นทำให้เกิดรอยร้าวซึ่งส่งผลต่อความนิ่มและการหดตัวของเปลือกแคปซูล (คล้ายกับภาพที่ 9) เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินชอบดูดน้ำจึงทำให้มีน้ำในระบบเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการระเหยด้วยการอบแห้ง โครงสร้างมีการหดตัวจึงเกิดเป็นร้าวในโครงสร้างฟิล์มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของมอลโทเดกซ์ทริน ทั้งนี้โครงสร้างจุลภาคส่วนภาคตัดขวางของเปลือกแคปซูลและฟิล์มบริโกลได้ (ภาพที่ 9) มีความคล้ายคลึงกัน



ภาพที่ 18 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของภาคตัดขวาง (cross section) ของเปลือกแคปซูลโดยมีอัตราส่วนของสตาร์ซ (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ที่แตกต่างกัน

3.3 การควบคุมการปลดปล่อยของเปลือกแคปซูล

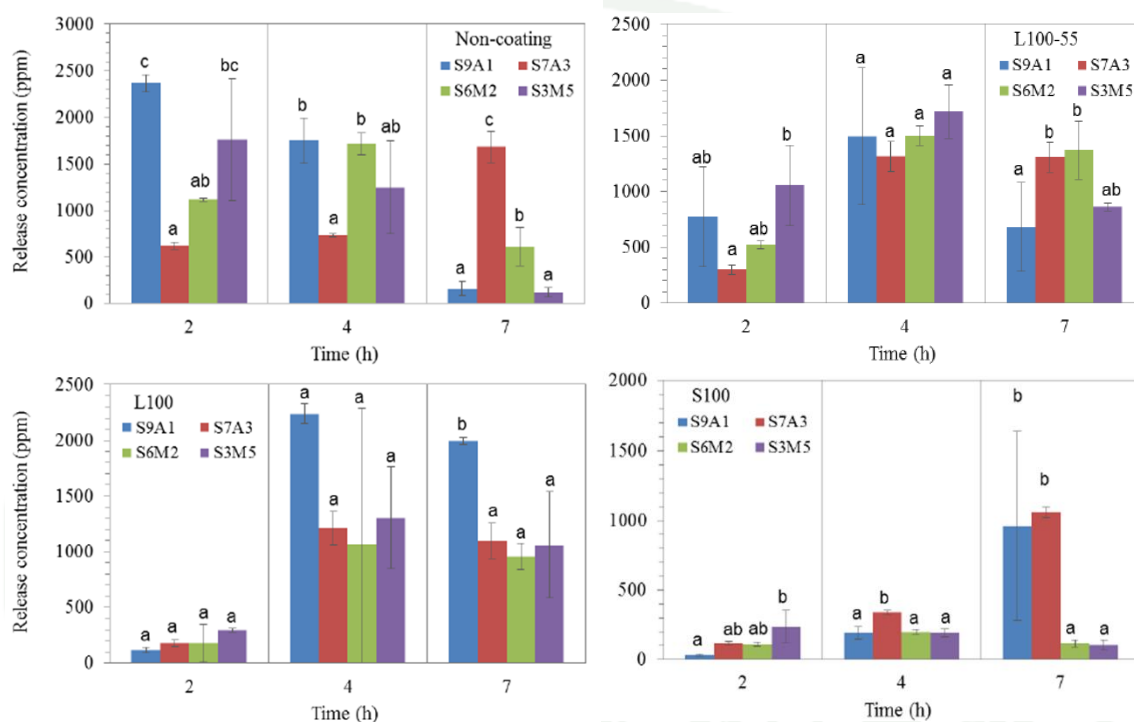
การศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยยาจากสูตร S09A1M0, S07A3M0, S06A2M2 และ S03A2M5 โดยการเคลือบสารทางการค้า ได้แก่ Eudragit® ผลิตจากพอลิเมทาคริเลท (polymethacrylate) ซึ่งใช้ในการเคลือบทางเภสัชศาสตร์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยของสารสำคัญ (active ingredients) ในตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย โดยการเคลือบเปลือกแคปซูลประกอบด้วย สูตร L100-55 (ปลดปล่อยยาในลำไส้ส่วนต้น) L100 (ปลดปล่อยยาในลำไส้เล็กส่วนกลาง) และ S100 (ปลดปล่อยยาในลำไส้เล็กส่วนปลายหรือลำไส้ใหญ่) เปลือกแคปซูลที่เคลือบมีลักษณะปรากฏ เช่นเดียวกับเปลือกแคปซูลที่ไม่ผ่านการเคลือบ วัสดุมีลักษณะใสและเป็นเนื้อเดียวกัน

การปลดปล่อยยาพาราเซตามอลจากเปลือกแคปซูลที่เคลือบด้วย Eudragit® ทั้งสามชนิด ภาพที่ 19 แสดงการปลดปล่อยยาเป็นปริมาณพาราเซตามอลในตัวทำละลายที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ ช่วงแรกเป็นการจำลองการปลดปล่อยยาในกระเพาะอาหารด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl pH=1) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ช่วงที่สองเป็นการจำลองการปลดปล่อยยาในลำไส้เล็กส่วนต้น (small intestine) ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffer pH=6.8) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และช่วงที่สามเป็นการจำลองการปลดปล่อยยาในลำไส้ส่วนปลาย (ileum หรือ colon) ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffer pH=7.4) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงเป็นระยะเวลา 2, 4 และ 7 ชั่วโมง

แคปซูลที่ผ่านการเคลือบ L100-55, L100 และ S100 แล้วมีประสิทธิภาพในการป้องกันการปลดปล่อยยาในระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรก หรือสภาวะกระเพาะอาหาร และเริ่มมีการปลดปล่อยยาในส่วนลำไส้เล็กส่วนต้น แคปซูลทุกสูตรที่ไม่ผ่านการเคลือบ (non-coating) มีการปลดปล่อยในช่วง 2 ชั่วโมงแรกสูงกว่าแคปซูลที่มีการเคลือบ แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบ Eudragit® สามารถยึดติดกับแคปซูลได้ดีทำให้สามารถลดการปลดปล่อยยาบริเวณกระเพาะอาหารได้ ซึ่งสอดคล้องกับ (Cole et al., 2002; Handali et al., 2018; Lal et al., 2016) รายงานว่า แคปซูลเจลาติน และไฮดรอกซีโพรพิลเมทาซิลเซลลูโลส (hydroxyl propyl methyl cellulose, HPMC) เมื่อเคลือบด้วย Eudragit® แคปซูลที่ได้ไม่มีรอยแตก หัก หรือร่วน มีความเป็นเนื้อเดียวกันและเมื่อศึกษาการปลดปล่อยยา พบว่าไม่มีการปลดปล่อยยาในสารละลาย HCl pH=1 และเริ่มมีการปลดปล่อยในช่วงลำไส้เล็ก อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วย Eudragit® ต่างชนิดกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการปลดปล่อยยาต่างกัน โดย Eudragit® L100-55 และ L100 จะมีการชะลอและลดการปลดปล่อยยาในช่วงแรก

(กระเพาะอาหาร) และเริ่มมีการปลดปล่อยยาได้ดีในช่วงที่สอง (ถ้าใส่เล็กส่วนต้นและส่วนกลาง) เนื่องจาก Eudragit® L100-55 และ L100 มีคุณสมบัติในการปลดปล่อยยาได้ดีใน pH มากกว่า 5.5 และ 6 ตามลำดับ ส่วน Eudragit® S100 สามารถชะลอการปลดปล่อยยาได้ทั้งในช่วงแรกและช่วงสองและเริ่มมีการปลดปล่อยในช่วงที่สาม (ถ้าใส่เล็กส่วนปลายหรือถ้าใส่ใหญ่) เนื่องจาก Eudragit® S100 มีความสามารถในการละลายในสารละลายที่มี pH มากกว่า 7 จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการเคลือบเปลือกแคปซูลด้วย Eudragit® สามารถที่จะใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยยา (control drug release) ปลดปล่อยยาตามเป้าหมายที่ต้องการ (target drug release) หรือชะลอการปลดปล่อย (delay release)

การค้นแปรสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินไม่ส่งผลต่อการควบคุมการปลดปล่อยในเปลือกแคปซูลที่มีการเคลือบ Eudragit® ทั้งสามสูตร ในขณะที่สูตรที่ไม่มีการเคลือบสาร Eudragit® พบการปลดปล่อยแตกต่างกันในช่วง 2 ชั่วโมง ภาพที่ 19 สูตรที่มีปริมาณอาการ์ร้อยละ 10 (S9A1) มีการปลดปล่อยยามากกว่าสูตรที่มีปริมาณอาการ์ร้อยละ 30 (S7A3) เนื่องจากอาการ์สามารถควบคุมการละลายของฟิล์มสตาร์ช ในขณะที่การเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 มีการปลดปล่อยยาน้อยกว่าการเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 50 เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินเป็นวัสดุเร่งการละลาย (สอดคล้องกับผลสภาพการละลายของฟิล์ม) ในช่วง 4-7 ชั่วโมง พบว่าการปลดปล่อยยามีการปลดปล่อยในปริมาณที่ลดลงอาจเนื่องมาจากปริมาณยาที่ปลดปล่อยในปริมาณมากในช่วง 2 ชั่วโมงแรก นอกจากนี้ความค้นแปรของสัดส่วนระหว่างสตาร์ช อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินไม่ส่งผลต่อการควบคุมการปลดปล่อยในเปลือกแคปซูลที่ไม่มีการเคลือบ Eudragit® หลังจากผ่านช่วง 2 ชั่วโมงแรกโครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์อาจถูกทำลาย เนื่องจากเกิดการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิกในส่วนอสัณฐาน เกิดเป็นโมเลกุลสั้น (Betancur & Chel, 1997) ดังนั้น การปลดปล่อยยาของแคปซูลที่เคลือบนั้นขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง (pH-sensitive polymer) ของสารละลาย



ภาพที่ 19 การปลดปล่อยยาพาราเซตามอลบรรจุในเปลือกแคปซูลที่มีการเคลือบด้วย Eudragit® S100, Eudragit® L100-55, และ Eudragit® L100 เป็นระยะเวลารวมในการปลดปล่อยของสาร คือ 2, 4 และ 7 ชั่วโมง ซึ่งแสดงถึงการละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl pH=1) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffer pH=6.8) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (phosphate buffer pH=7.4) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

4. การผลิตฟิล์มบริโกลได้ด้วยกระบวนการอัดรีด

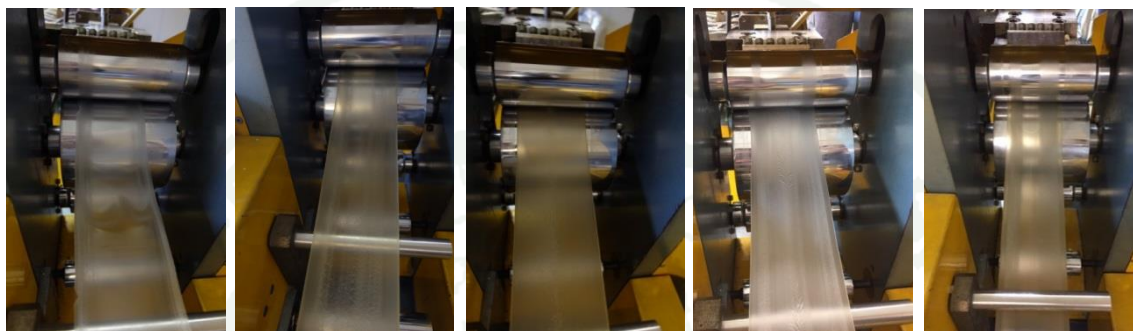
จากการศึกษาการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชข้าว อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินเพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบริโกลได้และเปลือกแคปซูลด้วยวิธีการหล่อสารละลายและการจุ่มด้วยแม่พิมพ์ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวิธีการขึ้นรูปฟิล์มบริโกลได้ด้วยวิธีการหล่อสารละลายนั้นไม่เป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากฟิล์มบริโกลได้นั้นมีข้อจำกัดในกระบวนการผลิต เช่น ระยะเวลาและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการผสมสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน (ตารางที่ 4) ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดเพื่อศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปของฟิล์มบริโกลได้ นอกจากนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการผลิตฟิล์มบริโกลได้ด้วยวิธีการอัดรีดนั้นสามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากการผลิตแบบการอัดรีดนั้นสามารถผลิตวัสดุและบรรจุภัณฑ์ได้เป็นจำนวนมากและใช้ระยะเวลาน้อยกว่าวิธีการหล่อสารละลาย

ความสามารถในการขึ้นรูปของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ผ่านหัวรีดแบบช่อง พบว่า ทุกสูตรสามารถขึ้นรูปได้และมีความสม่ำเสมอตลอดกระบวนการ ภาพที่ 20 ฟิล์มสตาร์ชร้อยละ 100 แสดงลักษณะปรากฏที่มีความใส มันวาว นอกจากนี้เมื่อเติมปริมาณอาการ์ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ทำให้ลักษณะปรากฏของฟิล์มนั้นมีความเหลืองของวัสดุมากขึ้นตามปริมาณของอาการ์ เนื่องจากอาการ์มีสีเหลืองอ่อนจึงทำให้วัสดุที่ได้มีสีเหลือง (Garrido et al., 2016) เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 และร้อยละ 40 ทำให้ฟิล์มนั้นมีลักษณะขุ่นตามปริมาณของมอลโทเดกซ์ทรินที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีขนาดโมเลกุลเล็กจึงทำหน้าที่เป็นสารเติมเต็มให้กับโครงสร้าง และเป็นพลาสติกไซเซอร์จึงทำให้ปริมาตรอิสระสูงขึ้น

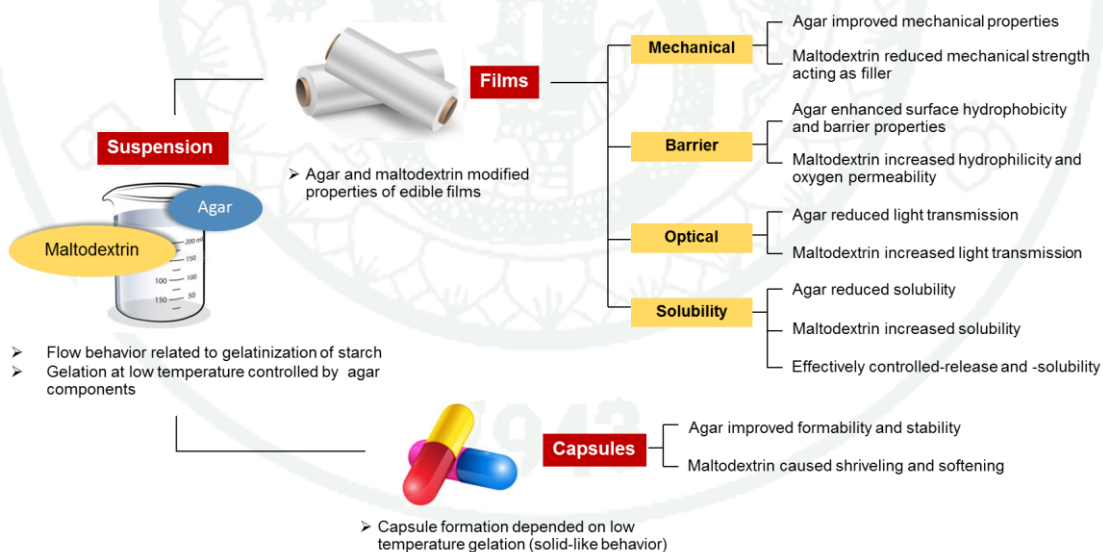
ระหว่างการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดรีด พบว่า ทุกสูตรมีความสามารถในการขึ้นรูปดี ฟิล์มมีความสม่ำเสมอ ไม่ฉีกขาด ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่น ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิลร้อยละ 100 (S100A0M0) มีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปน้อยกว่าฟิล์มที่มีองค์ประกอบของอาการ์ โดยเมื่อมีส่วนประกอบของอาการ์ประสิทธิภาพในการขึ้นรูปดีขึ้น เกิดการเกาะตัวและหลุดของฟิล์มลดน้อยลง ความยืดหยุ่นดีพร้อมทั้งฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงไม่เปราะแตกง่ายเหมือนฟิล์มสตาร์ชทั่วไป ทั้งนี้ฟิล์มที่มีมอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 20 (S8A0M0) มีความสามารถในการขึ้นรูป

ดีที่สุด พิล์มสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์จึงทำให้การขึ้นรูปมีประสิทธิภาพและมีความสม่ำเสมอระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

สถานีวิจัยของฟิล์มวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การดูดซับรังสีอินฟราเรด โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติฟิล์มแสดงดังตารางผนวกที่ 4 ภาพผนวกที่ 2, 3, 4 และ 5



ภาพที่ 20 ความสามารถในการขึ้นรูปของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ผ่านแม่พิมพ์แบบช่อง



ภาพที่ 21 อิทธิพลของสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินต่อสมบัติของสารแขวนลอย พิล์มบริโภคน้ำได้และเปลือกแคปซูล

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ฟิล์มบริโกลได้ที่ผลิตจากการผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชข้าวเจ้า อาการ์ (ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30) และมอลโทเดกซ์ทริน (ร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 60) สามารถขึ้นรูปเป็นเปลือกแคปซูลด้วยวิธีจุ่มสารละลายด้วยแม่พิมพ์ และขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อสารละลาย ฟิล์มแต่ละสัดส่วนมีสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณอาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน โดยการศึกษาสมบัติวิทยากระแสนของสารแขวนลอยบ่งชี้การเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ช การบวมพองและการเสียรูปร่างของเม็ดสตาร์ช รวมทั้งการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชและพอลิแซ็กคาไรด์ (อาการ์และมอลโทเดกซ์ทริน) รวมถึงการเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำที่ส่งผลหลักต่อความสามารถในการขึ้นรูปเปลือกแคปซูลด้วยการจุ่มด้วยแม่พิมพ์

การเติมอาการ์ (ร้อยละ 10-30) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุ เนื่องจากอาการ์มีโครงสร้างที่แข็งแรงทำให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสตาร์ชและอาการ์ การรวมกลุ่มของอาการ์ส่งผลทำให้พื้นผิวพื้นมีความขรุขระ นอกจากนี้การเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงของอาการ์ส่งผลทำให้สภาพการซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลง เนื่องจากอาการ์เพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับโครงสร้าง นอกจากนี้การเติมมอลโทเดกซ์ทริน (ร้อยละ 20-60) ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง ในขณะที่การดัดยัดและสภาพยอมให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าสตาร์ชและอาการ์จึงทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และลดอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นสาเหตุให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่และปริมาตรอิสระของเมทริกซ์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการแพร่ของโมเลกุลสูงขึ้น อีกทั้งการเติมมอลโทเดกซ์ทรินทำให้สภาพการละลายมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีขั้วและความชอบน้ำสูง สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้อง มอลโทเดกซ์ทรินจึงเร่งการละลายของวัสดุ ตรงข้ามกับการเติมอาการ์ทำให้สภาพการละลายลดลง เนื่องจากอาการ์ไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามปริมาณอาการ์ที่แตกต่างกันจากร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30 ไม่ส่งผลต่อการละลายน้ำและกรดอย่างมีนัยสำคัญ

การผสมระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล สตาร์ชข้าวเจ้า อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินสามารถขึ้นรูปเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์ โดยการเติมอาการ์ทำให้เปลือกแคปซูลมีความคงตัว เรียบและมีความสามารถในการขึ้นรูปดีขึ้นตามปริมาณอาการ์ที่

เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมมอลโทเดกซ์ทรินจะให้เปลือกแคปซูลที่นุ่ม มีการหดตัวและความคงตัวต่ำตามปริมาณมอลโทเดกซ์ทรินที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำเปลือกแคปซูลเคลือบด้วยสารเคลือบ Eudragit® ทำให้การปลดปล่อยยาขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ซึ่งสามารถปลดปล่อยได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ ดังนั้นการพัฒนาเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากสตาร์ชผสมอาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการละลายสำหรับการปลดปล่อยยาเพื่อขนส่งยาให้ตรงตามเป้าหมาย อีกทั้งสามารถผลิตเปลือกแคปซูลชนิดแข็งและฟิล์มบริโกลได้สำหรับพัฒนาวัสดุบรรจุบริโกลได้เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับสตาร์ชมันสำปะหลังและใช้บรรจุอาหารหรือยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยแสดงให้เห็นศักยภาพในการผลิตเปลือกแคปซูลชนิดแข็งด้วยการจุ่มขึ้นรูปซึ่งสามารถนำไปพัฒนาสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยอาจต้องปรับปรุงพารามิเตอร์การผลิตให้สอดคล้องกับการขึ้นรูป เช่น การไหลของวัสดุ การเปลี่ยนเฟสที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และการบ่มที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนี้จากสูตรข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์เพื่อผลิตแคปซูลชนิดนุ่มโดยการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยใช้กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเพื่อให้ผลผลิตที่มีประสิทธิภาพ จำนวนมากและใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังสามารถนำฟิล์มบริโกลได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการบรรจุอาหารเสริม สารปรุงแต่งหรือสารอาหารเพื่อใช้ในการบริโกลได้เพื่ออำนวยความสะดวก รวมทั้งสามารถลดปริมาณของขยะพลาสติกฐานปิโตรเลียมได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีแป้ง. สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

จิตติรัตน์ พินัยนิติศาสตร์. 2561. การพัฒนาของบริโภคนิยมและแคลงใจจากวัสดุผสมสารขมิ้น

ลำปะหลังไฮดรอกซีโพรพิลและสตาร์ชข้าว. มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐคนัย หาญการสุจริต. 2562. การเปลี่ยนแปลงเฟสในกระบวนการแปรรูป การบรรจุ และเก็บรักษา.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

ปริศนา สุวรรณภรณ์. 2561. การคัดแปรสตาร์ชทางกายภาพและการประยุกต์ใช้ในอาหาร. พรทรัพย์

การพิมพ์: กรุงเทพฯ.

เพ็ญโฉม พจนธรี. 2554. พิ ล้มและการเคลือบบริโภคนิยมกับการประยุกต์ใช้กับ อาหาร. วารสารการ

บรรจุภัณฑ์ 20(1), 6-10.

ศุภกัญญา ตันตระกูลบัณฑิตย์และปิ่นธนา เลิศสถิตธนกร. 2555. การละลาย (Dissolution).

สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. (2562). สถานะการค้ำมันสำปะหลัง. Retrieved from

<http://thaitapioca.org/>

Betancur, A. D., & Chel, G. L. (1997). Acid Hydrolysis and Characterization of Canavalia

ensiformis Starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45, 4237-4241.

Blanchard, P. H., & Katz, F. R. (2006). Modified Starches. In A. M. Stephen, G. O. Philips, & P. A.

Williams (Eds.), *Food Polysaccharides and Their Applications* (pp. 119-146). CRC Press:

Taylor & Francis Group.

Chaplin, M. (2019). Agar. Retrieved from <http://www1.lsbu.ac.uk/water/agar.html>

Chen, Y., Zhao, H., Liu, X., Li, Z., Liu, B., Wu, J., . . . Li, Y. (2016). TEMPO-oxidized Konjac

glucomannan as appliance for the preparation of hard capsules. *Carbohydrate Polymers*,

143, 262-269. doi:10.1016/j.carbpol.2016.01.072

Cole, E. T., Scott, R. A., Connor, A. L., Wilding, I. R., Petereit, H.-U., Schminke, C., . . . Cade', D.

(2002). Enteric coated HPMC capsules designed to achieve intestinal targeting.

International Journal of Pharmaceutics, 231, 83-95.

Colivet, J., & Carvalho, R. A. (2017). Hydrophilicity and physicochemical properties of chemically

modified cassava starch films. *Industrial Crops and Products*, 95, 599-607.

doi:10.1016/j.indcrop.2016.11.018

- da Rocha, M., Alemán, A., Romani, V. P., López-Caballero, M. E., Gómez-Guillén, M. C., Montero, P., & Prentice, C. (2018). Effects of agar films incorporated with fish protein hydrolysate or clove essential oil on flounder (*Paralichthys orbignyanus*) fillets shelf-life. *Food Hydrocolloids*, *81*, 351-363. doi:10.1016/j.foodhyd.2018.03.017
- Galus, S., Mathieu, H., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2012). Effect of modified starch or maltodextrin incorporation on the barrier and mechanical properties, moisture sensitivity and appearance of soy protein isolate-based edible films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *16*, 148-154. doi:10.1016/j.ifset.2012.05.012
- Garrido, T., Etxabide, A., Guerrero, P., & de la Caba, K. (2016). Characterization of agar/soy protein biocomposite films: Effect of agar on the extruded pellets and compression moulded films. *Carbohydr Polym*, *151*, 408-416. doi:10.1016/j.carbpol.2016.05.089
- Gaudin, S., Lourdin, D., Forssell, P. M., & Colonna, P. (2000). Antiplasticisation and oxygen permeability of starch–sorbitol films. *Carbohydrate Polymers*, *43*, 33-37.
- Handali, S., Moghimipour, E., Rezaei, M., Kouchak, M., Ramezani, Z., & Dorkoosh, F. A. (2018). In vitro and in vivo evaluation of coated capsules for colonic delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *47*, 492-498. doi:10.1016/j.jddst.2018.07.027
- Harnkarnsujarit, N., & Li, Y. (2017). Structure-property modification of microcrystalline cellulose film using agar and propylene glycol alginate. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*(47). doi:10.1002/app.45533
- Hassan, B., Chatha, S. A. S., Hussain, A. I., Zia, K. M., & Akhtar, N. (2018). Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *109*, 1095-1107. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097
- Hu, W. X., Chen, J., Xu, F., Chen, L., & Zhao, J. W. (2020). Study on crystalline, gelatinization and rheological properties of japonica rice flour as affected by starch fine structure. *Int J Biol Macromol*, *148*, 1232-1241. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.11.020
- Kaur, L., Singh, J., Singh, H., & McCarthy, O. J. (2008). Starch–cassia gum interactions: A microstructure – Rheology study. *Food Chemistry*, *111*(1), 1-10. doi:10.1016/j.foodchem.2008.03.027
- Kuhnen, S., Ogliari, J. B., Dias, P. F., Boffo, E. F., Correia, I., Ferreira, A. G., . . . Maraschin, M.

- (2010). ATR-FTIR spectroscopy and chemometric analysis applied to discrimination of landrace maize flours produced in southern Brazil. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(8), 1673-1681. doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02313.x
- Lal, S. S., Tanna, P., Kale, S., & Mhaske, S. T. (2016). Kafirin polymer film for enteric coating on HPMC and Gelatin capsules. *Journal of Materials Science*, 52(7), 3806-3820. doi:10.1007/s10853-016-0637-6
- Li, J.-Y., & Yeh, A.-I. (2001). Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. *Journal of Food Engineering*, 50, 141-148.
- Liu, Q., Charlet, G., Yelle, S., & Arul, J. (2002). Phase transition in potato starch–water system I. Starch gelatinization at high moisture level. *Food Research International*, 397-407.
- Luchese, C. L., Spada, J. C., & Tessaro, I. C. (2017). Starch content affects physicochemical properties of corn and cassava starch-based films. *Industrial Crops and Products*, 109, 619-626. doi:10.1016/j.indcrop.2017.09.020
- Motedayen, A. A., Khodaiyan, F., & Salehi, E. A. (2013). Development and characterisation of composite films made of kefir and starch. *Food Chem*, 136(3-4), 1231-1238. doi:10.1016/j.foodchem.2012.08.073
- Nagar, M., Sharanagat, V. S., Kumar, Y., Singh, L., & Mani, S. (2019). Influence of xanthan and agar-agar on thermo-functional, morphological, pasting and rheological properties of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 831-838. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.06.133
- Nguyen Vu, H. P., & Lumdubwong, N. (2016). Starch behaviors and mechanical properties of starch blend films with different plasticizers. *Carbohydr Polym*, 154, 112-120. doi:10.1016/j.carbpol.2016.08.034
- Panrong, T., Karbowiak, T., & Harnkarnsujarit, N. (2019). Thermoplastic starch and green tea blends with LLDPE films for active packaging of meat and oil-based products. *Food Packaging and Shelf Life*, 21. doi:10.1016/j.fpsl.2019.100331
- Parikh, A., Agarwal, S., & Raut, K. (2014). A REVIEW ON APPLICATIONS OF MALTODEXTRIN IN PHARMACEUTICAL INDUSTRY. *International Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 4(4), 67-74.
- Phan, T. D., Debaufort, F., Luu, D., & Voilley, A. (2005). Functional Properties of Edible Agar-

- Based and Starch-Based Films for Food Quality Preservation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(4), 973-981.
- Phan The, D., Debeaufort, F., Voilley, A., & Luu, D. (2009). Biopolymer interactions affect the functional properties of edible films based on agar, cassava starch and arabinoxylan blends. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 548-558. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.07.023
- Ravindra, D., Archana, K., Vandana, M., & Manisha, J. (2012). Advancement in manufacturing of non-gelatin capsule shell - A review. *International Journal of Advances in Pharmaceutical Research*, 3(10), 1178-1187.
- S.Hsu, Lu, S., & C.Huang. (2000). Viscoelastic Changes of Rice Starch Suspensions During Gelatinization. *Food Chemistry and Toxicology*, 65(2), 215-220.
- Soest, J. J. G. v., Tournois, H., Wit, D. d., & Vliegenthart, J. F. G. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 279, 201-214.
- Sousa, A. M., & Goncalves, M. P. (2015). Strategies to improve the mechanical strength and water resistance of agar films for food packaging applications. *Carbohydr Polym*, 132, 196-204. doi:10.1016/j.carbpol.2015.06.022
- Stanley, N. F. (2006). Agars. In A. M. Stephen, G. O. Philips, & P. A. Williams (Eds.), *Food Polysaccharides and Their Applications*. CRC Press: Taylor & Francis Group.
- Talou, M. H., Villar, M. A., Camerucci, M. A., & Moreno, R. (2011). Rheology of aqueous mullite–starch suspensions. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(9), 1563-1571. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2011.03.031
- Tian, H., Xu, G., Yang, B., & Guo, G. (2011). Microstructure and mechanical properties of soy protein/agar blend films: Effect of composition and processing methods. *Journal of Food Engineering*, 107(1), 21-26. doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.06.008
- Vorwerf, W., Dijksterhuis, J., Borghuis, J., Radosta, S., & Kröger, A. (2004). Film Properties of Hydroxypropyl Starch. *Starch - Stärke*, 56(7), 297-306. doi:10.1002/star.200300244
- Woggum, T., Sirivongpaisal, P., & Wittaya, T. (2015). Characteristics and properties of hydroxypropylated rice starch based biodegradable films. *Food Hydrocolloids*, 50, 54-64. doi:10.1016/j.foodhyd.2015.04.010

- Wu, Y., Geng, F., Chang, P. R., Yu, J., & Ma, X. (2009). Effect of agar on the microstructure and performance of potato starch film. *Carbohydrate Polymers*, 76(2), 299-304.
doi:10.1016/j.carbpol.2008.10.031
- Wurzburg, O. B. (2006). Modified Starches. In A. M. Stephen, G. O. Philips, & P. A. Williams (Eds.), *Food Polysaccharides and Their Applications* (pp. 87-146). CRC Press: Taylor & Francis Group.
- Xie, F., Yu, L., Chen, L., & Li, L. (2008). A new study of starch gelatinization under shear stress using dynamic mechanical analysis. *Carbohydrate Polymers*, 72(2), 229-234.
doi:10.1016/j.carbpol.2007.08.007
- Yadav, H., & Karthikeyan, C. (2019). Natural polysaccharides: Structural features and properties. In *Polysaccharide Carriers for Drug Delivery* (pp. 1-17).
- Zhang, L., Wang, Y., Liu, H., Yu, L., Liu, X., Chen, L., & Zhang, N. (2013a). Developing hydroxypropyl methylcellulose/hydroxypropyl starch blends for use as capsule materials. *Carbohydr Polym*, 98(1), 73-79. doi:10.1016/j.carbpol.2013.05.070
- Zhang, L., Wang, Y., Liu, H., Yu, L., Liu, X., Chen, L., & Zhang, N. (2013b). Developing hydroxypropyl methylcellulose/hydroxypropyl starch blends for use as capsule materials. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 73-79. doi:10.1016/j.carbpol.2013.05.070
- Zhang, N., Liu, H., Yu, L., Liu, X., Zhang, L., Chen, L., & Shanks, R. (2013). Developing gelatin-starch blends for use as capsule materials. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 455-461.
doi:10.1016/j.carbpol.2012.09.048
- Zhang, R., Wang, W., Zhang, H., Dai, Y., Dong, H., & Hou, H. (2019). Effects of hydrophobic agents on the physicochemical properties of edible agar/maltodextrin films. *Food Hydrocolloids*, 88, 283-290. doi:10.1016/j.foodhyd.2018.10.008
- Zhang, Y., Zhao, Q., Wang, H., Jiang, X., & Cha, R. (2017). Preparation of green and gelatin-free nanocrystalline cellulose capsules. *Carbohydrate Polymers*, 164, 358-363.
doi:10.1016/j.carbpol.2017.01.096
- Zhu, F. (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydr Polym*, 122, 456-480. doi:10.1016/j.carbpol.2014.10.063
- Zobel, H. F., & Stephen, A. M. (2006). Starch: Structure, Analysis, and Application. In A. M. Stephen, G. O. Philips, & P. A. Williams (Eds.), *Food Polysaccharides and Their*

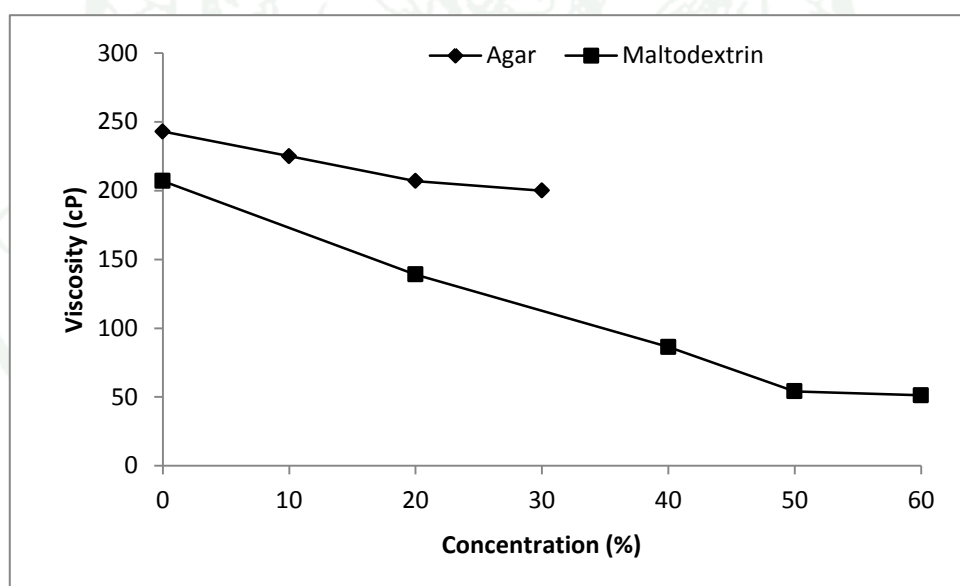
Applications (pp. 25-86). CRC Press: Taylor & Francis Group.





ตารางผนวกที่ 1 ความหนาของเปลือกแคปซูลขนาดแข็ง (n=15)

สูตร	ความหนา (มิลลิเมตร)
S10A0M0	0.134±0.022 ^{ab}
S9A1M0	0.156±0.019 ^c
S8A2M0	0.133±0.022 ^{ab}
S7A3M0	0.143±0.025 ^{abc}
S8A2M0	0.133±0.022 ^{ab}
S6A2M2	0.146±0.021 ^{bc}
S2A2M6	0.128±0.017 ^a



ภาพผนวกที่ 1 ความหนืดของสารแขวนลอยทดสอบด้วยเครื่อง Brookfield digital viscometer (Model LVE DV-II+ with spindle 2H)

ตารางผนวกที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติของเปลือกแคปซูลชนิดแข็งจากสัตว์ส่วนระหว่างสัตว์รบกวนที่แตกต่างกัน โดยวิธีการจุ่มด้วยแม่พิมพ์และเปลือกแคปซูลชนิดแข็งที่นิยมใช้ในการจุ่มการคั่วซึ่งผลิตมาจากเจลลาติน (n=5)

ชนิดของแคปซูล	ความหนา (Talebi <i>et al.</i>)	ความแรงต้านทานการกด (N)	สภาพการละลาย 1 ชั่วโมง	
			น้ำหนัก (%)	กรดไฮโดร-คลอริก pH=1 (%)
เปลือกแคปซูลผสม (S07A03M0)	0.13±0.05	3.13±1.96	20.01±1.19	25.63±3.92
เปลือกแคปซูลเชิงการค้า	0.69±0.34	31.84±1.40	100.00±0.00	100.00±0.00

หมายเหตุ ความแรงต้านทานการกดด้วยเครื่อง Universal testing machine (Testometric Micro 350, Rochdale, England) โดยใช้หัวกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ด้วยแรงกด 5 มิลลิเมตรต่อเนื่อง และระงะกกดจนกว่าตัวอย่างเกิดความเสียหาย (sample break)

ตารางผนวกที่ 3 เครื่องมือทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด

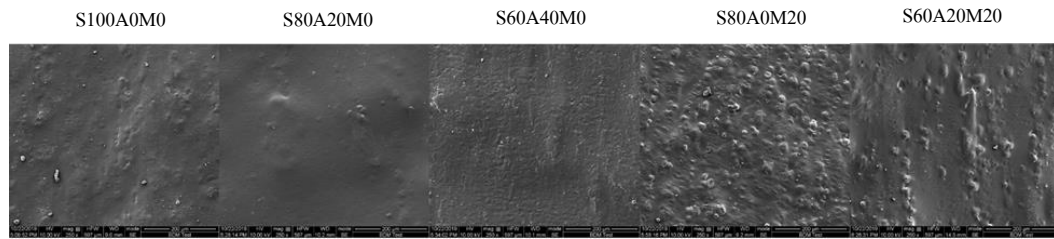
สมบัติ	เครื่องมือ
สัณฐานวิทยา	เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (JSM-IT300, JEOL Ltd., USA)
วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโต มิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) (Evolution 300 UV-Vis Spectrophotometer, Thermo Fisher Scientific, USA)
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (Diffractometer D8, Bruker AXS, Germany).
สมบัติเชิงกล	เครื่องทดสอบแรงดึง (Instron test machine) (5965, Instron, UK)
ค่ามุมสัมผัสน้ำ	เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Dataphysics OCA15EC, Dataphysics Instruments GmbH, Germany)
สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ	วิธี Cup method (ASTM E96-80)
สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ออกซิเจน	เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeation a nalyzer) (Model 8501, Illinois, USA)
สมบัติทางกายภาพ (การส่องผ่านของแสง)	เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโต มิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) (Evolution 300 UV-Vis Spectrophotometer, Thermo Fisher Scientific, USA)

ตารางผนวกที่ 4 สมบัติเชิงกล สภาพซึมผ่าน ได้ของ เอน้ำ สภาพซึมผ่าน ได้ของแก๊สออกซิเจนและค่ามุมสัมผัสของฟิล์มสตาร์หมันสายปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล อาการ์และมอลโทเดกซ์ทรินที่อัตราส่วนต่างกัน

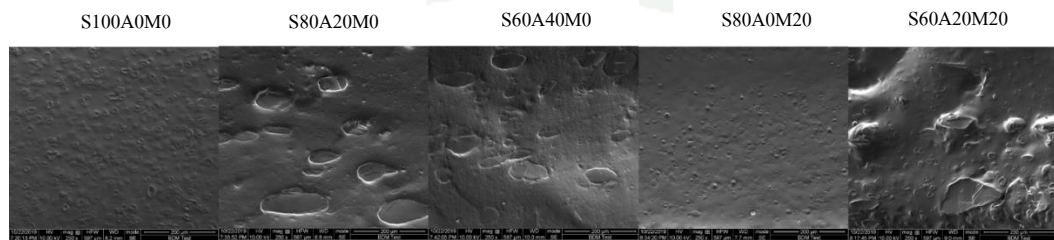
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Water vapor permeability (g.mm/m ² .h.Kpa)	Oxygen permeability (cm ³ .mm/m ² .day.kPa)	Contact angle (°)
S100A0M0	3.4±0.5 ^c	198.5±39.3 ^c	0.98±0.04 ^d	327.13±43.19 ^b	66.00±3.09 ^d
S80A20M0	2.2±0.5 ^b	136.8±27.1 ^b	0.89±0.05 ^{bc}	414.26±68.08 ^c	61.00±3.92 ^{bc}
S60A40M0	3.3±0.3 ^c	132.3±12.9 ^b	0.96±0.05 ^{cd}	207.78±32.75 ^a	54.64±3.72 ^a
S80A0M20	1.4±0.1 ^a	266.0±32.6 ^d	0.86±0.01 ^b	304.59±21.02 ^b	60.19±3.02 ^b
S60A20M20	2.0±0.3 ^b	91.4±21.6 ^a	0.74±0.04 ^a	138.14±1.41 ^a	63.82±1.43 ^{cd}

หมายเหตุ ตัวอักษร S แทน สตาร์หมันสายปะหลังไฮดรอกซีโพรพิล
A แทน อาการ์
M แทน มอลโทเดกซ์ทริน

ตัวอักษรพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในคอลัมน์เดียวกัน (p≤0.05)

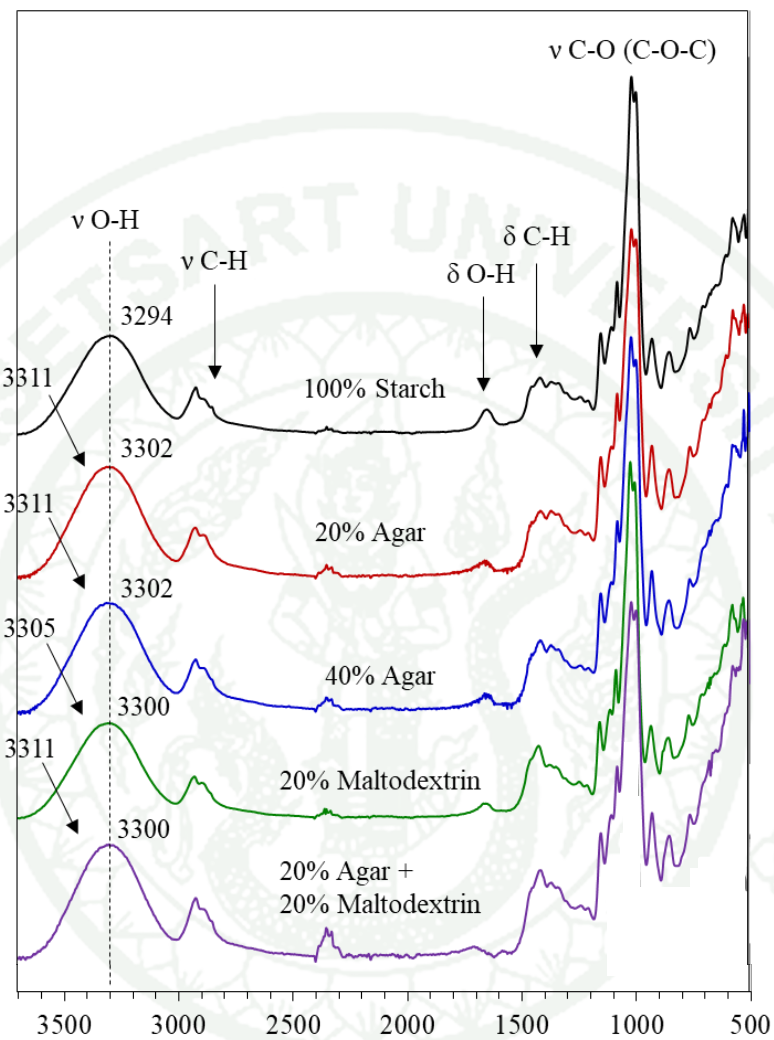


(ก)

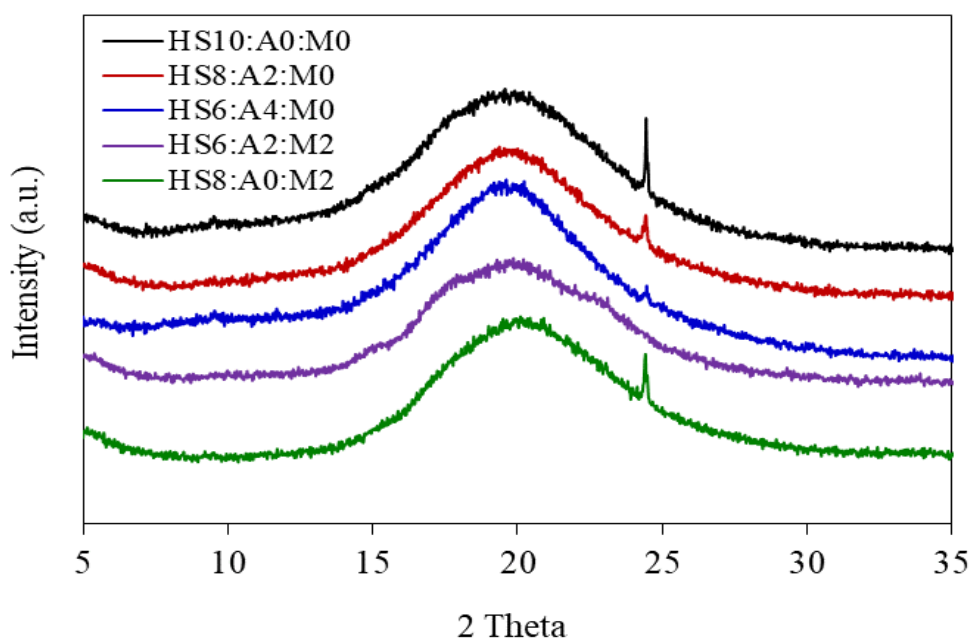


(ข)

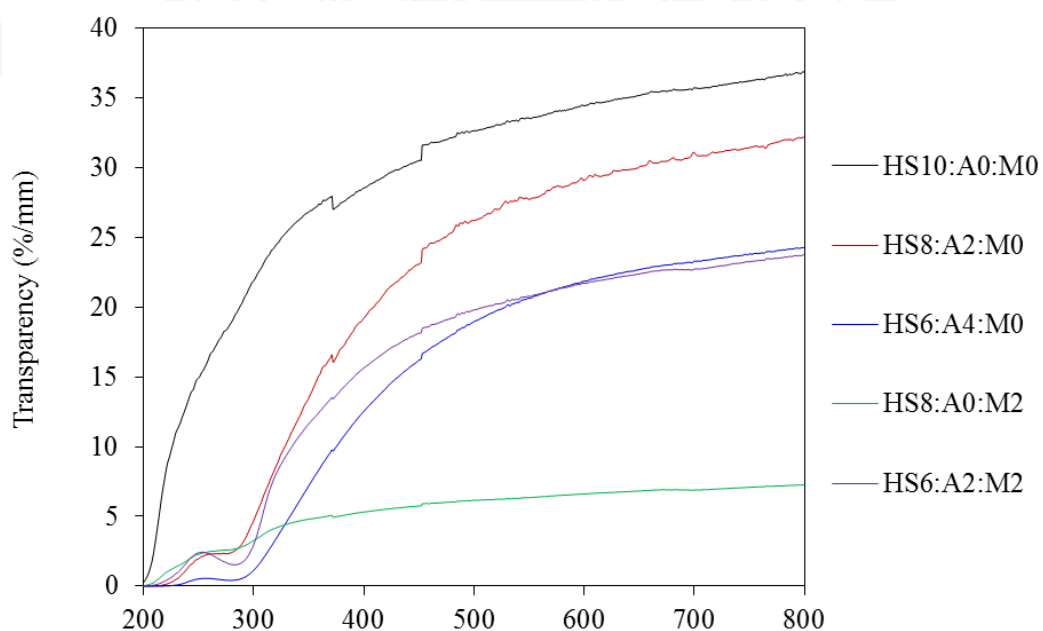
ภาพผนวกที่ 2 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของ (ก) พื้นผิว และ (ข) ภาควัดขวาง (cross section) ของฟิล์ม โดยมีอัตราส่วนของสตาร์ซ (S) อาการ์ (A) และมอลโทเดกซ์ทริน (M) ที่แตกต่างกัน



ภาพผนวกที่ 3 สเปกตรัมอินฟราเรดของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาการ์และมอลโทเดกซ์-
ทรินแตกต่างกัน



ภาพผนวกที่ 4 ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มสตาร์ชที่มีสัดส่วนของอาการ์และมอลโทเดกซ์-ทรินแตกต่างกัน



ภาพผนวกที่ 5 การส่องผ่านของแสงที่ความยาว 200-800 nm โดยมีปริมาณอาการ์ และมอลโทเดกซ์ทรินที่แตกต่างกัน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	พรรณวิภา วงษ์พันธุ์
วัน เดือน ปี เกิด	23 มกราคม 2540
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	107 หมู่ 2 ตำบลบางปลาเฒ่า อำเภอบางปลาเฒ่า จังหวัดสุพรรณบุรี 72150
ประวัติการศึกษา	วทบ. (เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน	1. แสดงผลงานโดยการนำเสนอปากเปล่าในงาน The 6th Packaging & Materials Innovation Symposium (PMIS 2018) ในหัวข้อ การศึกษาสมบัติการละลายของสตาร์ชผสมเพื่อการพัฒนาวัตกรรมการผลิตแคปซูลกินได้ (Investigation of starch blend dissolution for potent development of novel edible capsules) กรุงเทพฯ, ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 2-3 พฤษภาคม 2562 2. แสดงผลงานโดยการนำเสนอโปสเตอร์ในงาน การประชุมวิชาการ The 7th International Conference on Bio - Based Polymers (ICBP 2019) ในหัวข้อ Improving Properties and Solubility of Starch-based Edible Capsule Shells using Seaweed Polysaccharide กรุงเทพฯ, ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 11 - 13 พฤศจิกายน 2562 3. แสดงผลงานโดยการนำเสนอแบบปากเปล่าในงาน การประชุมวิชาการ The 5th International Conference on Food and Applied Bioscience 2020 ในหัวข้อ Mechanical, Physical and Barrier Properties of Edible Starch and Polysaccharide Blend Films Produced by Extrusion เชียงใหม่, ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 6-7 กุมภาพันธ์ 2563
ผลงานตีพิมพ์	1. Wongphan, P., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Characterization of starch, agar and maltodextrin blends for controlled dissolution of edible films. International Journal of Biological Macromolecules. - วันที่ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์: 6 เมษายน 2563 - เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร (ISSN) : 0141-8130 - ฐานข้อมูล : ScienceDirect (Elsevier) - ค่า impact factor : 5.162 (ปี 2020) 2. Wongphan, P., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Edible packaging from

hydroxypropyl Thermoplastic cassava starch, agar and maltodextrin blends produced by cast-extrusion. Institute of Food Science & Technology.

- วันที่ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์: 16 กรกฎาคม 2563

- เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร (ISSN) : 1365-2621

- ฐานข้อมูล : Wiley

- ค่า impact factor : 2.773 (ปี 2020)

3. ผลงานประชุมวิชาการ (Proceeding) ระดับนานาชาติ ชื่อบทความ Mechanical, Physical and Barrier Properties of Edible Starch and Polysaccharide Blend Films Produced by Extrusion ชื่องานประชุมวิชาการ The International Conference on Food and Applied Bioscience 2020: Insights for Research and Industry 4.0 หน้าที่ 72-77 ปี 2020 คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่, ประเทศไทย
download : : <http://202.28.24.38/Home/Home.aspx?menu=25>