

**การศึกษาสมบัติทางกายภาพและความร้อนของฟิล์มบริโภาคได้
จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซีน**
**Study on Physical and Thermal Properties of Edible Films
from Modified Cassava Starch Incorporated with Zein Protein**

ฉนกร หยกสหชาติ^{1*} เบนจวนรณ เชิดชูเผ่าพงศ์¹ สโรชา นิรมิตมหาปัญญา¹ สุภาพร พาเจริญ¹ ภสุโชค หยกสหชาติ²
Chanakorn Yokesahachart^{1*}, Benjawan Chardchopowpong¹, Sarocha Niramitmahapanja¹, Supaporn Pajareon¹,
Phasuchoke Yokesahachart²

Received: December 11, 2018

Revised: April 17, 2019

Accepted: May 14, 2019

บทคัดย่อ

ฟิล์มบริโภาคได้เป็นวัสดุสัมผัสอาหารโดยตรง ได้แก่ ฟิล์มบางสำหรับห่อหุ้ม และฟิล์มเคลือบ สตาร์ชมันสำปะหลัง เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมากในประเทศไทย ราคาถูก ซึ่งนิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมอาหาร และสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ อย่างไรก็ตามฟิล์มบริโภาคได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น สมบัติเชิงกลแอ่นและว่องไวต่อความชื้น ด้วยเหตุนี้สมบัติของฟิล์มบริโภาคได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังจึงต้องถูกปรับปรุงด้วยวิธีต่างๆ เช่น การดัดแปรทางเคมีของสตาร์ช และการผสมกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบริโภาคได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซีนโดยวิธีการเทหล่อฟิล์ม ซึ่งใช้กลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์ ส่วนฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปรแต่มีการเติมโปรตีนซีนถูกใช้เป็นฟิล์มควบคุม จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซีนมีลักษณะใส สีเหลืองอ่อน และมีความหนาอยู่ในช่วง 0.19–0.21 มิลลิเมตร ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน นิ่ม และยืดหยุ่น ในขณะที่ฟิล์มควบคุมมีลักษณะแข็งและแข็งแรง ส่วนฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงก์ที่มีการเติมโปรตีนซีนมีความเข้ากันได้ของเฟสสตาร์ชและเฟสโปรตีนต่ำ จึงทำให้สมบัติเชิงกลและการดูดซับน้ำแย่ การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการออกซิเดชันทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังและโปรตีนซีนดีขึ้น

คำสำคัญ: ฟิล์มบริโภาคได้ สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร โปรตีนซีน สมบัติเชิงกล การดูดซับน้ำ

ABSTRACT

Edible films are direct food contact materials i.e. thin films for food wrapping and film coating. Cassava starch is abundant in Thailand, cheap, it is often used as a raw material in food industry and film formability. However, edible films from cassava starch have some drawbacks such as poor mechanical properties and water sensitivity. Therefore, the properties of edible films from cassava starch have to be improved with different methods such as chemical modification of starch, and blending with hydrophobic polymers, etc. The present research studied preparation and properties of edible films from modified cassava starch with added zein protein by film casting using glycerol as a plasticizer. An unmodified cassava starch film with added zein protein was used as a control film. The results showed that modified cassava starch films with added zein protein were transparent, pale yellow and possess thickness in the range of 0.19–0.21 mm. The oxidized cassava starch film with added zein protein was homogenous, soft and flexible, whereas control film was stiff and strong. The cross-linked cassava starch film with added zein protein exhibited poor homogeneity of starch phase and protein phase, so its tensile properties and water absorption were inferior. Modification of cassava starch with oxidation gave good compatibility between cassava starch and zein protein.

Keywords: edible films, modified cassava starch, zein protein, mechanical properties, water absorption

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

บทนำ

ฟิล์มบริโภคน้ำได้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง ทำมาจากวัสดุที่สามารถรับประทานได้ และใช้ห่อหุ้มอาหาร [1] ฟิล์มบริโภคน้ำได้มีบทบาทที่สำคัญต่อการป้องกัน (การเสียหายของผลิตภัณฑ์อาหารจากแรงกลทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลินทรีย์) การกระจายสินค้า และการตลาดในอุตสาหกรรมอาหาร ฟิล์มบริโภคน้ำได้ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารควรมีราคาถูก ทำมาจากวัสดุที่หาได้ง่าย มีความต้านทานแรงดึงและความยืดหยุ่นที่ดี มีความใสและมีสีทึบสว่าง กันการซึมผ่านของก๊าซต้านทานน้ำ/ไอน้ำและจุลินทรีย์ รวมถึงผู้บริโภคนสามารถยอมรับได้ ฟิล์มบริโภคน้ำได้สามารถขึ้นรูปได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น โปรตีน [2,3] ไขมัน [3] และสตาร์ช [3,4,5,6] เป็นต้น

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีราคาถูก มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส และสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งมีปริมาณมากในประเทศและประเทศไทย เป็นหนึ่งในประเทศผู้ส่งออกมันสำปะหลังรายใหญ่ของโลก มันสำปะหลังประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต แคลเซียม ฟอสฟอรัส และวิตามินซีในปริมาณสูง แต่มีโปรตีน แร่ธาตุ และวิตามินชนิดอื่นปริมาณต่ำ [7] สตาร์ชสามารถหาใหม่ทดแทนได้ ราคาถูก มีความหลากหลาย และสามารถรับประทานได้ สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์สายตรงหรือแอมิโลส (amylose) และพอลิเมอร์สายกิ่งหรือแอมิโลเพคติน (amylopectin) [8] ซึ่งสตาร์ชสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้โดยกระบวนการเดียวกันกับการขึ้นรูปฟิล์มโดยทั่วไป เช่น การหล่อขึ้นรูป (casting) [2,3,5,6] การอัดรีด (extrusion) [4,9] และการเป่า (blowing) [4] เป็นต้น อย่างไรก็ตามฟิล์มบริโภคน้ำได้จากสตาร์ชยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ว่องไวต่อความชื้นและความแข็งแรงต่ำ [1] ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของสตาร์ชด้วยวิธีต่างๆ เช่น การผสมสตาร์ชกับพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่ชอบน้ำ และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีทางเคมี (chemical modification) ซึ่งเป็นทางเลือกที่นิยมใช้ในการนำมาปรับปรุงสมบัติของสตาร์ชในปัจจุบัน แต่การปรับปรุงด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อการ

ปรับปรุงสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ของสตาร์ชได้ ดังนั้นการดัดแปรสตาร์ชทางเคมีร่วมกับการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่ชอบน้ำจึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากความแข็งแรงของสตาร์ชที่ต่ำและการว่องไวต่อความชื้นที่สูงอาจจะถูกปรับปรุงไปพร้อมกัน

โปรตีนซีน (zein protein) เป็นโปรตีนจากธรรมชาติที่สกัดได้จากข้าวโพด มีลักษณะเป็นของแข็ง สีเหลือง ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในแอลกอฮอล์ ยูเรียเข้มข้น สารละลายต่างเข้มข้น (pH เท่ากับหรือมากกว่า 11) และดีเทอร์เจนท์ชนิดประจุลบ โปรตีนซีนประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดอะมิโน ชนิดที่ไม่มีซัลเฟอร์ เช่น ไกลซีน อลานีน วาลีน ลิวซีน ไอโซลิวซีน ฟีนอลลานีน ทรีปโตเฟน และโพรลีน เป็นต้น รวมถึงกรดอะมิโนชนิดไดซัลไฟด์ เช่น เมไทโอนีน และซิสเทอีน [10] ซึ่งส่งผลให้โปรตีนซีนมีความไม่ชอบน้ำและเมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรง [10,11] จากการทบทวนเอกสารที่ผ่านมาพบการผสมสตาร์ชชนิดต่างๆ กับโปรตีนซีน เช่น สตาร์ชข้าวโพด [12,13,14,15,16,17,18] สตาร์ชข้าวสาลี [19] และสตาร์ช มันสำปะหลัง [9] เป็นต้น ส่วนการดัดแปรทางเคมีของสตาร์ชนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ช เช่น สมบัติความหนืด และอายุของสตาร์ชในผลิตภัณฑ์สุดท้าย เป็นต้น [20] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถปรับปรุงความชอบน้ำของสตาร์ชให้ลดลงได้ สตาร์ชดัดแปรทางเคมีมีหลากหลายชนิดและหาซื้อได้ทั่วไป ซึ่งสมบัติของสตาร์ชดัดแปรทางเคมีขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้และระดับการถูกแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสตาร์ช ยกตัวอย่างเช่นสตาร์ชออกซิไดซ์ (oxidized starch) คือสตาร์ชที่ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเป็นสาเหตุให้สายโซ่ของสตาร์ชถูกตัดและเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชเป็นหมู่คาร์บอนิล ดังนั้นกำลังการพองตัวและความหนืดจึงมีค่าลดลง สตาร์ชออกซิไดซ์ถูกใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ อย่างไรก็ตามสตาร์ชออกซิไดซ์เป็นที่นิยมใช้เพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากมีความใส ความหนืดต่ำ ความคงตัวสูง และมีสมบัติเป็นกาว สตาร์ชออกซิไดซ์ในอุตสาหกรรมอาหารถูกผลิตโดยปฏิกิริยาเคมีระหว่างสตาร์ชกับสารเคมี เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

peroxide) เปอร์ราซีติก แอซิด (peracetic acid) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate) และโซเดียมคลอไรท์ (sodium chlorite) เป็นต้น [8,20] นอกจากนี้ยังมีสตาร์ชครอสลิง (cross-linked starch) ซึ่งเป็นสตาร์ชที่มีพันธะโควาเลนต์เชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช เป็นผลให้แกนนูลทนต่อความร้อน แรงเฉือน และสภาวะกรด-ด่างเพิ่มขึ้น สตาร์ชครอสลิงมีความสามารถในการทนสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะโควาเลนต์ที่ใช้เชื่อมข้าม สตาร์ชครอสลิงมักใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดที่มีความหนืดคงตัวในสภาวะที่มีสภาพกรด (low pH) และแรงเฉือนสูง เช่น กระบวนการโฮโมจีไนเซชัน (homogenization) [8,20] สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดัดแปรสตาร์ชทางเคมีร่วมกับการผสมกับโปรตีนซินมีเพียง 3 งานวิจัย ซึ่งเป็นการผสมโปรตีนซินกับสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรด้วยวิธีครอสลิง [11] สตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน [21] และสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชัน [22] จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มจากสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรด้วยวิธีครอสลิงผสมกับโปรตีนซิน มีความชอบน้ำลดลง และความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น [11] ส่วนฟิล์มจากสตาร์ชข้าวโพดดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันผสมกับโปรตีนซินมีค่าการดูดซับน้ำที่ลดลง ในขณะที่ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสของยัง และระยะยืดจนขาดสูงขึ้น [22] เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม นอกจากนี้ฟิล์มจากสตาร์ชกล้วยดัดแปรด้วยวิธีออกซิเดชันผสมกับโปรตีนซินมีค่าความต้านทานแรงดึงและระยะยืดจนขาดเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม อย่างไรก็ตามฟิล์มยังคงมีความชอบน้ำอยู่ [21]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมและทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบริโกลด์จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซิน ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลในโหมดแรงดึง และการดูดซับน้ำ ในการทดลองได้มีการผันแปรชนิดสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรทางเคมี 2 ชนิด คือสตาร์ชออกซิไดซ์ (oxidized starch) และสตาร์ชครอสลิง (cross-linked starch) และเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุมคือ ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปรแต่มีการเติมโปรตีนซิน

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

1. สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรและสารเคมีต่างๆ

สตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปร ตราปลามังกร ถูกซื้อมาจากบริษัทห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น ประเทศไทย สตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์และสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงได้รับอนุเคราะห์จากบริษัท เฟิร์สสตาร์ช อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด สตาร์ชมันสำปะหลังทั้ง 3 ชนิด ถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นก่อนนำไปเตรียมฟิล์มบริโกลด์ โปรตีนซินถูกซื้อมาจากบริษัท Sigma-Aldrich, USA กลิเซอร์อล (commercial grade) ถูกซื้อมาจากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอปอเรชั่น จำกัด และเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ (commercial grade) ถูกซื้อมาจากบริษัท Apex Alco co.,Ltd.

2. การเตรียมฟิล์มบริโกลด์จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซิน

ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซิน ถูกเตรียมโดยวิธีการเทหล่อฟิล์ม ในการทดลองได้ผันแปรชนิดของสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปร 2 ชนิด คือ สตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ และสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิง ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปรแต่มีการเติมโปรตีนซินถูกใช้เป็นฟิล์มควบคุม ในขั้นตอนแรกสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลังถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ น้ำกั้นเป็นตัวทำละลาย แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมกวนที่ความเร็ว 290 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องกวนให้ความร้อน (SLR SI Analytics GmbH, Germany) เป็นเวลา 60 นาที โดยทำในระบบปิด (ปิดด้วยเพลทที่มีการวางน้ำแข็งบนปีกเกอร์เพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลาย) หลังจากนั้นร่อนสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลังกลายเป็นสารละลายใสจึงเติมกลีเซอร์อลลงไป (ปริมาณกลีเซอร์อลที่เติมลงไปเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสตาร์ชแห้ง) ต่อมากวนให้เข้ากันอีกเป็นเวลา 5 นาที ในเวลาใกล้เคียงกันสารละลายโปรตีนซินถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เอทานอลเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวทำละลาย โดยกวนพร้อมให้ความร้อนในระบบปิดที่สภาวะเดียวกันกับการเตรียมสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลัง ร่อนสารละลายโปรตีน

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ขึ้น กลายเป็นสารละลายสีเหลืองใส หลังจากนั้นผสมสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลังและสารละลายโปรตีนขึ้นเข้าด้วยกัน และกวนต่ออีกเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเทสารละลายผสมปริมาณ 400 มิลลิลิตร ลงในถาดอะคริลิกที่มีขนาดประมาณ 30 เซนติเมตร × 30 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อน (FD 53, WTB binder, USA) ที่อุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบลมร้อน และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ลอกฟิล์มจากถาดอะคริลิก แล้วเก็บไว้ในกล่องภาชนะปิดเพื่อรอทดสอบต่อไป

3. การตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบรีโกลได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรเสริมโปรตีนขึ้น

3.1 ความหนาของฟิล์ม

ตัวอย่างฟิล์มถูกวัดความหนาด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, Japan) โดยวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 100 มิลลิเมตร จำนวน 5 จุด

3.2 ลักษณะวิทยาของฟิล์ม

ตัวอย่างฟิล์มถูกนำมาทำให้แห้งในไนโตรเจนเหลว และหักเพื่อตรวจสอบพื้นผิวตัดขวางของฟิล์ม จากนั้นนำไปติดบนสตัปโดยใช้เทปคาร์บอนสองหน้า กำจัดความชื้นและเคลือบทองภายใต้สภาวะสุญญากาศ ก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM, JEOL JSM-6610V, USA) เพื่อตรวจสอบลักษณะวิทยา ส่วนการตรวจสอบลักษณะวิทยาที่พื้นผิวของฟิล์มนั้น ทำโดยติดแผ่นฟิล์มบนสตัป จากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกันกับการตรวจสอบภาพตัดขวาง

3.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม

ตัวอย่างฟิล์มถูกตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กประมาณ 6 มิลลิกรัม และใส่ในครุชีเบิล เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนและอุณหภูมิสลายตัวโดยเครื่องเทอร์โมล กราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (thermal gravimetric analyzer, TGA, Mettler Toledo TGA/DSC1, Switzerland) โดยใช้อุณหภูมิทดสอบอยู่ในช่วง 30-500 องศาเซลเซียส อัตรา

การเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาต่อนาที การวิเคราะห์ทำภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองทำตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

3.4 สมบัติเชิงกลในโหมดแรงดึงของฟิล์ม

สมบัติเชิงกลในโหมดแรงดึงของฟิล์มถูกตรวจสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882 ตัวอย่างฟิล์มถูกตัดให้มีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 100 มิลลิเมตร แล้วนำไปปรับสภาพในเดซิกเคเตอร์ที่บรรจุสารละลายอิมิตัวแมกนีเซียมไนเตรท ($Mg(NO_3)_2$) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50 ± 5 เปอร์เซ็นต์) เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน จากนั้นนำไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (TA-XT plus Texture Analyzer, England) ซึ่งมีสภาวะในการทดสอบดังนี้ โหลดเซลล์เท่ากับ 5 กิโลนิวตัน ระยะเกจเท่ากับ 50 มิลลิเมตร และความเร็วในการดึงเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตรต่อนาที การทดลองทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.5 การดูดซับน้ำของฟิล์ม

การดูดซับน้ำของฟิล์มถูกตรวจสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D570 ตัวอย่างฟิล์มถูกตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 1 นิ้ว และความยาวเท่ากับ 1 นิ้ว แล้วนำฟิล์มที่ตัดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อยู่ในตัวอย่างฟิล์ม ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (W_0) จุ่มฟิล์มลงในน้ำกลั่นปริมาณ 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มขึ้นจากน้ำ ชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษทิชชู แล้วนำตัวอย่างที่ซับน้ำออกแล้วไปชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่อไป การทดลองทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ} = ((W_1 - W_0) / W_0) \times 100$$

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) เวอร์ชัน 20 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของข้อมูลและ

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ข้อมูลที่วิเคราะห์มาจากข้อมูลดิบอย่างน้อย 3 ซ้ำ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ความหนาของฟิล์ม

ฟิล์มควบคุมมีความหนาประมาณ 0.28 มิลลิเมตร ความหนาของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม ดังแสดงใน Table 1 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความหนืดของสตาร์ชตัดแปรทางเคมีลดลง จึงทำให้สารละลายผสมสามารถไหลได้ง่ายและทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอหรืออาจเป็นเพราะอนุภาคของโปรตีนซีนที่กระจายตัวอยู่ในพื้นผิวของฟิล์มควบคุม ที่เห็นได้ชัดเจนจากภาพของพื้นผิวฟิล์มควบคุม (Figure 2a) ซึ่งส่งผลให้ความหนามีความไม่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีน ดังแสดงใน Figure 2b-c

Table 1 Thickness of different films

Formulas of films	Thickness (mm)
Control	0.28±0.09 ^a
Oxidized cassava starch with added zein protein	0.21±0.02 ^b
Cross-linked cassava starch with added zein protein	0.19±0.01 ^b

The data is reported as mean±SD (n=5). The different small letters in the same column indicate significant difference at $p < 0.05$ (Duncan's new multiple range test).

2. ลักษณะวิทยาของฟิล์ม

ฟิล์มควบคุม ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีน และฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีนมีความใสและสีเหลืองอ่อน (Figure 1a-c)

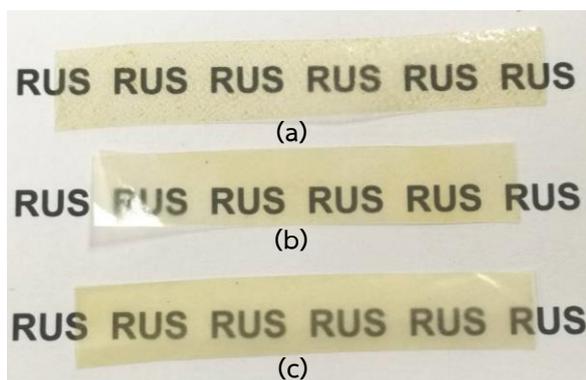


Figure 1 Appearances of different films: (a) control (b) oxidized cassava starch with added zein protein and (c) cross-linked cassava starch with added zein protein.

พื้นผิวของฟิล์มถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Figure 2a-c) พื้นผิวฟิล์มควบคุมมีพื้นผิวก่อนข้างเรียบ แต่ยังพบอนุภาคของโปรตีนซีน กระจายตัวอยู่ที่ผิวฟิล์ม (Figure 2a) ในทำนองเดียวกับการรายงานของ Chanvrier และคณะ ที่พบการแยกเฟสของโปรตีนซีนกับสตาร์ชข้าวโพด จากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชข้าวโพดผสมกับโปรตีนซีน ซึ่งพวกเขาให้เหตุผลว่าอาจเป็นเพราะการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคโปรตีนซีนและสตาร์ชข้าวโพดต่ำ [12] และในทำนองเดียวกันกับการรายงานของ Corradini และคณะ ซึ่งพบการแยกเฟสของสตาร์ชข้าวโพดและโปรตีนซีนในชั้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชข้าวโพดผสมกับโปรตีนซีน ที่มีการผสมโปรตีนซีนตั้งแต่ที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป จากการผลตรวจสอบสัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของชิ้นงานรูปร่างคัมเบลล์ที่พบว่า มีช่องว่างอยู่ในเนื้อของชิ้นงาน ซึ่งเป็นสาเหตุให้อันตรกิริยาระหว่างสตาร์ชข้าวโพดและโปรตีนซีนเกิดขึ้นต่ำ [13,14] ส่วนพื้นผิวฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลัง

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนมีพื้นผิวเรียบ และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Figure 2b) ในขณะที่พื้นผิวฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังโครอสลิงที่มีการเติมซีนมีความขรุขระ (Figure 2c) ซึ่งให้เห็นว่าสตาร์ชมันสำปะหลังโครอสลิงและโปรตีนซีนมีความเข้ากันได้ต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าเวลาในการผสมสารละลายสตาร์ชและสารละลายโปรตีนซีนน้อย ซึ่งมีผลการทดลองที่ยืนยันจาก Goa และคณะ ที่เตรียมและทดสอบฟิล์มสตาร์ชข้าวโพด โครอสลิงผสมกับโปรตีนซีน ที่มีการเติมปริมาณโปรตีนซีนเท่ากับ 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพวกเขาทดลองเตรียมฟิล์มจากวิธีการผสมที่แตกต่างกัน 2 วิธี จากนั้นจึงตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มดังกล่าวด้วยกล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ พวกเขาพบว่าการผสมสารละลายสตาร์ชและสารละลายโปรตีนซีนรวมกันและให้ความร้อนต่ออีกเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงขึ้นไป

ส่งผลให้ฟิล์มสตาร์ชข้าวโพดโครอสลิงผสมกับโปรตีนซีนมีความเข้ากันได้มากขึ้น [11]

ในการทดลองยังตรวจสอบภาพตัดขวางของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอีกด้วย (Figure 2d-f) เนื่องจากภาพตัดขวางของฟิล์มจะแสดงเนื้อของฟิล์ม ซึ่งจะอธิบายความเป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์มได้ดี จากผลการทดลองพบว่าเนื้อของฟิล์มควบคุมและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมซีนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Figure 3d-e) ซึ่งให้เห็นว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ตัดแปรและสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์กับโปรตีนซีนมีความเป็นเนื้อเดียวกันดี แต่เนื้อของฟิล์มสตาร์ช มันสำปะหลังโครอสลิงที่มีการเติมซีนเกิดการแยกชั้นของฟิล์ม และเนื้อของฟิล์มมีช่องว่างขนาดเล็กๆ แทรกอยู่ (Figure 2f) ซึ่งให้เห็นว่าสตาร์ชมันสำปะหลังโครอสลิงกับโปรตีนซีนมีความเข้ากันได้ต่ำ

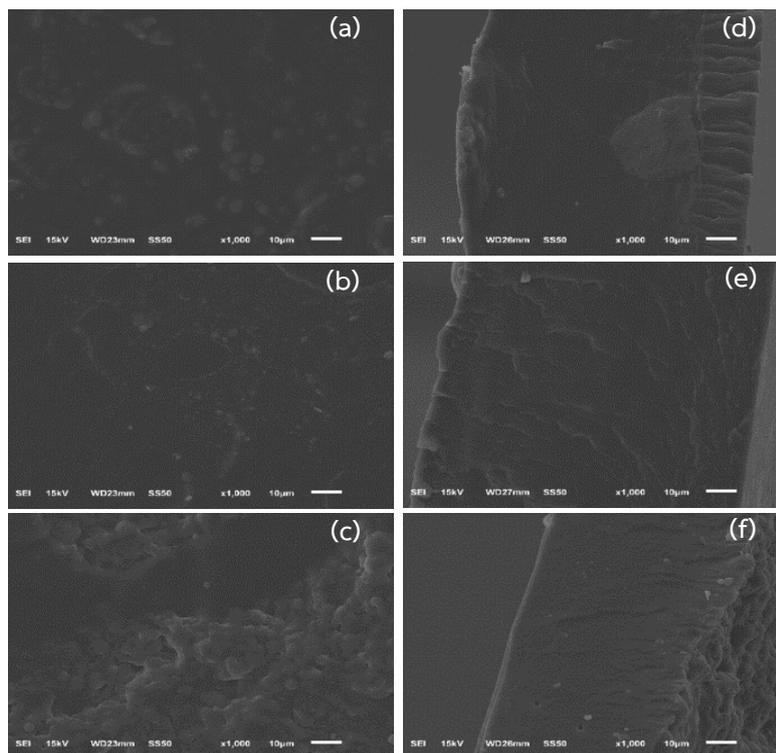


Figure 2 Surface morphology at 1,000X of different films: (a) control (b) oxidized cassava starch with added zein protein and (c) cross-linked cassava starch with added zein protein as well as cross-section morphology at 1,000X of different films: (d) control (e) oxidized cassava starch with added zein protein and (f) cross-linked cassava starch with added zein protein.

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

3. ความเสถียรทางความร้อนและอุณหภูมิสลายตัวของฟิล์ม

ตัวอย่างฟิล์มถูกตรวจสอบความเสถียรทางความร้อนและอุณหภูมิสลายตัวด้วยเทคนิค TGA โดยทดสอบที่อุณหภูมิในช่วง 30–500 องศาเซลเซียส (Figure 3) จากผลการทดลองพบว่าการสูญเสียน้ำหนักของฟิล์มควบคุมฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซินและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซินแสดงการสูญเสียน้ำหนัก 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการระเหยของน้ำและการสลายตัวของกลีเซอรอล [9] ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 30-150 องศาเซลเซียส ส่วนชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของสตาร์ช [9] อยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 150-390 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Figure 3a-c) ส่วนการสลายตัวของโปรตีนซินเกิดในช่วงเดียวกันกับการสลายตัวของสตาร์ช จึงไม่สามารถเห็นการสลายตัวของโปรตีนซินได้อย่างชัดเจน ฟิล์มควบคุมทนต่อความร้อนได้สูงกว่าฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซินและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซิน ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 180-320 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเป็นไปได้จากการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ตัดแปรกับหมู่อะมิโนหรือหมู่คาร์บอกซิลของโปรตีนซิน สำหรับส่วนที่เหลือของตัวอย่างฟิล์มหลังจากการเผาจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนที่เหลือของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซินมีค่าสูงกว่าฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซิน และฟิล์มควบคุม ตามลำดับ เนื่องจากการคงเหลือของสารอินทรีย์ต่างๆ (เช่น คลอรีน [23] และ ฟอสฟอรัส [24] เป็นต้น) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ชด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน [23] และการครอสลิง [24] อุณหภูมิการสลายตัวสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากพิกของกราฟ DTG อุณหภูมิสลายตัวของฟิล์มควบคุมมีค่าประมาณ 328 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสลายตัวของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซินและอุณหภูมิสลายตัวของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซิน ประมาณ 6-10 องศาเซลเซียส ซึ่งให้เห็นว่าฟิล์มควบคุมสลายตัวได้ยาก ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง

ระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ได้ตัดแปรกับโปรตีนซิน ในทำนองเดียวกันกับผลของความเสถียรทางความร้อน

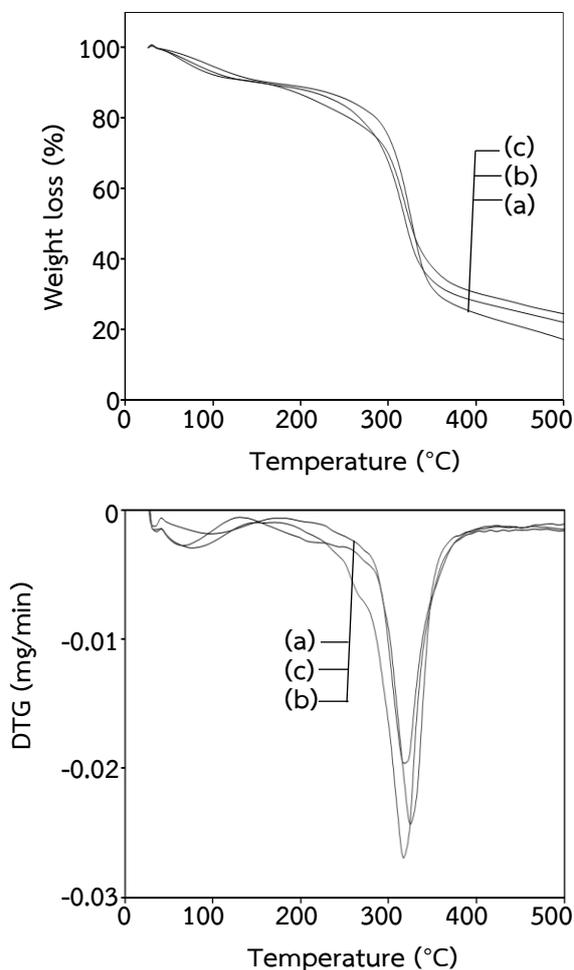


Figure 3 Weight loss and DTG of different films: (a) control (b) oxidized cassava starch with added zein protein and (c) cross-linked cassava starch with added zein protein using TGA technique.

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

4. สมบัติเชิงกลในโหมดแรงดึงของฟิล์ม

ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสของยัง และระยะยืดจนขาดของฟิล์มควบคุม ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลัง ออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีน และฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีนถูกทดสอบในโหมดแรงดึงตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882 (Figure 4) ความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของยังของฟิล์มควบคุมมีค่ามากกว่าฟิล์มสตาร์ช มันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มควบคุมมีความแข็งแรงและแข็ง ในขณะที่ค่าระยะยืดจนขาดของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนมีค่าสูงกว่าฟิล์มควบคุมและฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีน ซึ่งเห็นว่าฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีนมีลักษณะยืดหยุ่น การตัดแปรสตาร์ช มันสำปะหลังทางเคมีส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของยังมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชถูกแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอนิลหรือฟอสเฟตจากการตัดแปรทางเคมีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือการครอสลิง จึงส่งผลให้โอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรกับโปรตีนซีนเป็นไปได้ยาก เมื่อเทียบกับพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในฟิล์มควบคุม นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าระยะยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซีน อย่างไรก็ตามค่าระยะยืดจนขาดของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับฟิล์มควบคุม ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะความเข้ากันได้ของสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงกับโปรตีนซีนที่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับภาพพื้นผิว (Figure 2c) และภาพตัดขวาง (Figure 2f) ของฟิล์มดังกล่าว

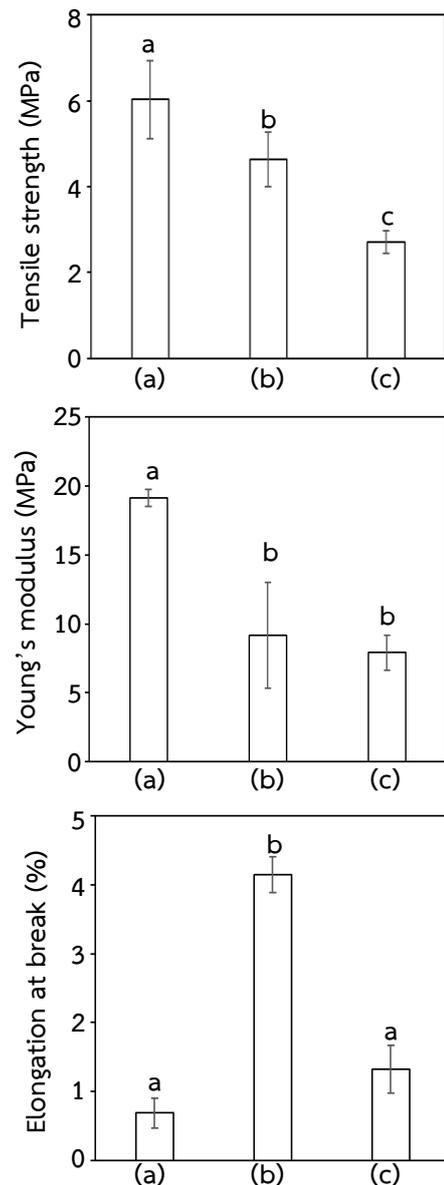


Figure 4 Tensile strength, Young's modulus and elongation at break of different films: (a) control (b) oxidized cassava starch with added zein protein and (c) cross-linked cassava starch with added zein protein. The data is reported as mean±SD (n=3). The different small letters in the bar graph indicate significant difference at $p < 0.05$ (Duncan's new multiple range test).

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

5. การดูดซับน้ำของของฟิล์ม

การดูดซับน้ำของฟิล์มควบคุม ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซัน และฟิล์มสตาร์ช มันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซันถูกตรวจสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D570 การดูดซับน้ำของฟิล์มควบคุมมีค่าประมาณ 2.64 เปอร์เซ็นต์ ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซันมีค่าการดูดซับน้ำไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุมมากนัก ทั้งนี้ อาจเป็นไปได้ว่าการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลสตาร์ชด้วยหมู่คาร์บอนิลยังคงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของน้ำได้ จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับน้ำของฟิล์มสตาร์ช มันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมโปรตีนซัน ในขณะที่การดูดซับน้ำของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซันมีค่าสูงที่สุด (ประมาณ 4.06 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งให้เห็นว่าฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลัง

ครอสลิงที่มีการเติมโปรตีนซันมี ความสามารถในการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิห้องได้ดี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความไม่เข้ากันระหว่างสตาร์ชครอสลิงและโปรตีนซัน (จากภาพพื้นผิว Figure 2c และภาพตัดขวาง Figure 2f) หรืออาจเป็นผลเนื่องจากการเกิดโครงร่างตาข่ายระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังกับสารครอสลิง ทำให้โครงสร้างของฟิล์มดูดซับและกักเก็บน้ำไว้ในเมทริกซ์ของฟิล์มดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับน้ำของ Shi และคณะที่เตรียมฟิล์มสตาร์ชข้าวโพดครอสลิงผสมกับลิกนิน พวกเขาพบว่าการดูดซับน้ำของฟิล์มสตาร์ชข้าวโพดครอสลิงผสมกับลิกนินมีค่ามากกว่าฟิล์มควบคุม เนื่องจากการเกิดโครงร่างตาข่ายระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับสารครอสลิง และจำนวนพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดการครอสลิงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และสารครอสลิง [24]

Table 3 Water absorption of different films

Formulas of films	Water absorption percentage (× 100%)
Control	2.64±0.43 ^b
Oxidized cassava starch with added zein protein	2.11±0.46 ^b
Cross-linked cassava starch with added zein protein	4.06±0.39 ^a

The data is reported as mean±SD (n=3). The different small letters in the same column indicate significant difference at $p < 0.05$ (Duncan's new multiple range test).

สรุปผล

ฟิล์มบริโภคน้ำได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซันสามารถเตรียมและขึ้นรูปโดยวิธีการเทหล่อฟิล์ม โดยใช้ก๊าสีเซอร์อลพลาสตีไซเซอร์ ฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซันใส มีสีเหลืองอ่อนและนิ่ม ซึ่งฟิล์มมีความหนาประมาณ 0.19-0.21 มิลลิเมตร ระยะยืดจนขาดของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มสตาร์ช มันสำปะหลังออกซิไดซ์ที่มีการเติมซัน ซึ่งให้เห็นว่าฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซันมีลักษณะยืดหยุ่น อย่างไรก็ตามความเสถียรทางความร้อน อุณหภูมิสลายตัว ความต้านทานแรงดึง โมดูลัสของยังของฟิล์ม

สตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซันยังคงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มควบคุม การดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการออกซิเดชันส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างสตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัสดุที่ชอบน้ำกับโปรตีนซันซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ในทางตรงกันข้ามการดัดแปรสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธีการครอสลิง ทำให้เกิดการแยกของเฟสสตาร์ชและโปรตีนซัน จึงทำให้ฟิล์มมีสมบัติที่แย่งลง

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (หมายเลขทุน: 61202003) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Falguera, V. Quintero, J.P. Jimenez, A. Munoz, J.A. and Ibarz, A. (2011). Edible films and coatings: structures, active functions and trends in their use. *Trends in Food Science & Technology*. 22(6): 292-303.
- [2] Krochta, J.M. (2002). Protein-based films and coatings. CRC Press. Boca Raton, FL.
- [3] Mehyar, G.F. Al-Ismael, K. Han, J.H. and Chee, G.W. (2012). Characterization of edible coatings consisting of pea starch, whey protein isolate, and carnauba wax and their effects on oil rancidity and sensory properties of walnuts and pine nuts. *Journal of Food Science*. 77(2): E52-E59.
- [4] Dang, K.M. and Yoksan, R. (2016). Morphological characteristics and barrier properties of thermoplastic starch/chitosan blown film. *Carbohydrate Polymers*. 150: 40-47.
- [5] Kechichian, V. Ditchfield, C. Veiga-Santos, P and Tadini, C. C. (2010). Natural antimicrobial ingredients incorporated in biodegradable films based on cassava starch. *LWT-Food Science and Technology*. 43(7): 1088-1094.
- [6] Vu, H.P.N. and Lumdubwong, N. (2016). Starch behaviors and mechanical properties of starch blend films with different plasticizers. *Carbohydrate Polymers*. 154: 112-120.
- [7] Muzanila, Y.C. Brennan, J.G. and King, R.D. (2000). Residual cyanogens, chemical composition and aflatoxins in cassava flour from Tanzanian villages. *Food Chemistry*. 70: 45-49.
- [8] Lumdabwong, N. (2014). Analysis and modification of starch. Bangkok: Asia Digital Press.
- [9] Yokesahachart, C. and Yoksan, R. (2011). Effect of amphiphilic molecules on characteristics and tensile properties of thermoplastic starch and its blends with poly (lactic acid). *Carbohydrate Polymers*. 83(1): 22-31.
- [10] Shukla, R. and Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial crops and products*. 13:171-192.
- [11] Goa, P. Wang, F. Gu, F. Ning, J. Liang, J. and Li, N. and Ludescher, R.D. (2017). Preparation and characterization of zein thermo-modified starch films. *Carbohydrate Polymers*. 157: 1254-1260.
- [12] Chanvrier, H. Colonna, P. Valle, G.D. and Lourdin, D. (2005). Structure and mechanical behavior of corn flour and starch-zein based materials in glassy state. *Carbohydrate Polymers*. 59: 109-119.
- [13] Corradini, E. Medeiros, E.S. Carvalho, A.J.F. Curvelo, A.A.S. and Mattoso, L.H.C. (2006). Mechanical and morphological characterization of starch/zein blends plasticized with glycerol. *Journal of Applied Polymer Science*. 101(6): 4133-4139.
- [14] Corradini, E. Carvalho, A.J.F. Curvelo, A.A.S. Agnelli, J.A.M. and Mattoso, L.H.C. (2007). Preparation and characterization of thermoplastic starch/zein blends. *Materials Research*. 10(3): 227-231.
- [15] Lim, S. and Jane, J. (1994). Storage stability of injection-molded starch-zein plastics

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

²Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

- under dry and humid conditions. *Journal of Environmental Polymer Degradation*. 2(2): 111-120.
- [16] Ryu, S.Y. Rhim, J.W. Roh, H.J. and Kim, S.S. (2002). Preparation and physical properties of zein-coated high-amylose corn starch film. *LWT - Food Science and Technology*. 35(8): 680-686.
- [17] Santiago, G.T. Gente, C.R. Lara, S.G. Verdolotti, L. Maio, E.D. and Lannace, S. (2014). Strategies to produce thermoplastic starch-zein blends: effect on compatibilization. *Journal of Polymers and the Environment*. 22(4): 508-524.
- [18] Zeng, M. Huang, Y. Lu, L. Fan, L. and Lourdin, D. (2011). Effects of filler-matrix morphology on mechanical properties of corn starch-zein thermo-moulded films. *Carbohydrate Polymers*. 84(1): 323-328.
- [19] Habeych, E. Dekkers, B. Goot, A.J. and Boom, R. (2008). Starch-zein blends formed by shear flow. *Chemical Engineering Science*. 63: 5229-5238.
- [20] Xie, S.X. Liu, Q. and Cui, S.W. (2005). *Food carbohydrates chemistry, physical properties, and applications*. CRC press. Boca Raton, FL.
- [21] Garcia, E.A. Fera, J.S. Villalobos, R.R. Gonzalez, F.R. Perez, A.J. and Huicochea, E.F. (2014). Properties of edible films based on oxidized starch and zein. *International Journal of Polymer Science*. Article ID 292404: 9 pages.
- [22] Spence, K.E. Jane, J. and Pometto, A.L. (1995). Dialdehyde starch and zein plastic: Mechanical properties and biodegradability. *Journal of environmental polymer degradation*. 3(2): 69-74.
- [23] Zhang, Y.R. Wang, X.L. Zhao, G.M. and Wang, Y.Z. (2012). Preparation and properties of oxidized starch with high degree of oxidation. *Carbohydrate Polymers*. 87: 2554-2562.
- [24] Shi, R. and Li, B. (2016). Synthesis and characterization of cross-linked starch/lignin films. *Starch/Starke*. 68: 1-9.

* Corresponding author e-mail: y.chanakorn@gmail.com

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ