รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาสูตรและการจำแนกคุณลักษณะของฟิล์มบริโภคได้จากแป้งและสตาร์ชข้าว (ระยะที่ 1)

Formulation and Characterization of Edible Film from Rice Flour and Starch (Phase 1)

โดย

อ. ดร.รุ่งอรุณ สาสนทาญาติ

อ.ดำรงพล คำแหงวงศ์

งานวิจัยนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาสูตรและการจำแนกคุณลักษณะของฟิล์มบริโภคได้จากแป้งและสตาร์ชข้าว (ระยะที่ 1) ได้สำเร็จลุล่วงโดยได้รับเงินอุดหนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่สนับสนุน ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ อุปกรณ์และสถานที่ตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย อีกทั้งให้ความอนุเคราะห์วิเคราะห์ความเป็นผลึกโดย X-ray diffraction (XRD) รวมทั้งลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) ทั้งนี้คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์ในโอกาสต่อๆไป

คณะผู้วิจัย

พฤษภาคม 2558

บทสรุปผู้บริหาร

งานวิจัยนี้เกิดจากแนวคิดพื้นฐานซึ่งพยายามเพิ่มการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้สินค้าข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจอันดับหนึ่งของประเทศไทย โดยการสกัดเอาองค์ประกอบเฉพาะส่วนคือแป้งหรือสตาร์ช ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเมล็ดข้าวถึง 85-90% มาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มชนิด starch based film ซึ่งสามารถบริโภคได้และสามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพจึงมีข้อดีที่เหนือกว่าฟิล์มพลาสติก และยังเหนือกว่าฟิล์มโพลีเมอร์ธรรมชาติจากสัตว์ เช่น เจลาตินหรือไคโตซาน เนื่องจากแป้งหรือข้าวปราศจากโปรตีนที่อาจก่อให้เกิดอาการภูมิแพ้ในผู้บริโภคบางรายได้ นอกจากนี้ยังสอดรับกับความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มที่เป็นมังสวิรัติที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในยุคปัจจุบัน

ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานด้านโครงสร้าง กายภาพ เคมี และคุณสมบัติการก่อเจลของแป้งและสตาร์ชจากข้าว และพัฒนาสูตรการเตรียมฟิล์มที่ใช้แป้งหรือสตาร์ชดังกล่าวเป็นส่วนประกอบหลักร่วมกับสารเสริมคุณภาพได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม และพลาสติไซเซอร์ และสรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความแข็งแรงและยืดหยุ่นของฟิล์มที่เตรียมได้ ร่วมกับคุณภาพแง่อื่นๆ โดยสิ่งที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัยนี้คือ ทราบสูตรการเตรียมฟิล์มจากวัตถุดิบข้าวที่เหมาะสม ทราบคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มได้แก่ สี ความหนา ลักษณะเนื้อฟิล์ม ความเป็นผลึก ทราบคุณสมบัติเชิงป้องกันของฟิล์มที่ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงขาด อัตราการยืดตัว อัตราการซึมผ่านของก๊าซและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และทราบแนวโน้มในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร

ผลการทำวิจัยแสดงให้เห็นว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น มีความเหมาะสมในการเตรียมเป็นฟิล์มมากกว่าแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวธรรมดา เนื่องจากให้เจลที่มีความแข็งแรงสูงและให้เนื้อฟิล์มใส โดยสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายฟิล์มประกอบด้วย สตาร์ชข้าวดัดแปรที่มีความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนัก กลีเซอรอล 16.14% ของน้ำหนักสตาร์ช และคาราจีแนน 1.29% ของน้ำหนักสตาร์ช โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีคุณสมบัติเด่นคือสามารถป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี แต่มีข้อด้อยคือมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสังเคราะห์จากพลาสติกสามชนิดได้แก่ พอลีเอทิลีน (polyethylene) พอลีโพรไพลีน (polyporpylene)และเซลโลเฟน (cellophane) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพฟิล์มดังกล่าวต่อไป อย่างไรก็ตามในเบื้องต้นนี้พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ชั้นในสำหรับบรรจุหรือห่อหุ้ม

อาหารแห้งต่างๆ โดยเฉพาะอาหารที่มีส่วนประกอบของไขมันสูง เนื่องจากสามารถป้องกันออกซิเจนได้ดี จึงช่วยชะลอการเหม็นหืนของไขมันในอาหารได้

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยในเชิงวิชาการ ทำให้ทราบองค์ความรู้ซึ่งสนับสนุนความก้าวหน้าในเชิงวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของสตาร์ช โดยผลงานทางวิชาการส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ในชื่อเรื่อง Formulation and Optimization of Heat-Moisture Treated Rice Starch–Glyceral-Carrageenan Composite Film Using Response Surface Methodology ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ The 3rd Thai-Japan Biobplastics and Biobased Materials Symposium (AIST - NIA - TBIA Joint Symposium) ณ โรงแรมพูลแมน กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 7-8 พฤศจิกายน 2555 ประโยชน์ของงานวิจัยนี้ในเชิงเศรษฐกิจ ทำให้ทราบแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของสินค้าข้าวมากขึ้น ถ้ามีผู้ประกอบการนำผลงานวิจัยไปพัฒนาต่อยอดในเชิงพาณิชย์ ก็จะสร้างโอกาสในการเพิ่มรายได้แก่เกษตรกรผู้ปลูกข้าว อันจะส่งเสริมการเติบโตทางเศรษฐกิจในภาพรวมของประเทศ

บทคัดย่อ

ในการคัดเลือกวัตถุดิบข้าวที่เหมาะสมในการนำมาเตรียมฟิล์มบริโภคได้ ได้แก่แป้งข้าว สตาร์ชข้าวธรรมดา และสตาร์ชข้าวดัดแปรด้วยวิธีใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น (Hydrothermal treatment) ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสอยู่ระหว่าง 31.04-33.75% พบว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรมีความเหมาะสมในการเตรียมเป็นฟิล์มมากที่สุด เนื่องจากให้เจลที่มีความแข็งแรงสูงและให้เนื้อฟิล์มใส จากนั้นจึงทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายฟิล์มจากสตาร์ชข้าวดัดแปรที่มีความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนัก และสารเสริมคุณภาพสองชนิดได้แก่ พลาสติไซเซอร์คือกลีเซอรอล 10 20 และ 30% ของน้ำหนักสตาร์ช และไฮโดรคอลลอยด์คือคาราจีแนน 0.5 1.0 และ1.5% ของน้ำหนักสตาร์ช พบว่าการผันแปรปริมาณสารเสริมคุณภาพทั้งสองชนิดในฟิล์มไม่ส่งผลต่อลักษณะเนื้อฟิล์มที่ตรวจดูโดย SEM หรือความเป็นผลึกเมื่อตรวจวิเคราะห์โดย XRD แต่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงป้องกันของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) สามารถหารูปแบบสมการพหุนาม (polynomial equation) ได้แก่ ค่าความชื้น (R^2=79.56%) ค่าความสว่าง (L*) (R^2=78.67%) ค่าสีแดง (a*) (R^2=95.11%) ความแตกต่างของค่าสี (R^2=78.57%) ความหนา (R^2=68.31%) ความต้านทานแรงดึงขาด (R^2=90.51%) อัตราการยืดตัว (R^2=78.97%) และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (R^2=74.37%) อย่างไรก็ตามการผันแปรปริมาณกลีเซอรอลและคาราจีแนนไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสีเหลือง (b*) ค่าความทึบแสง ค่าความโปร่งใส และอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ระหว่างสมการพหุนามดังกล่าว โดยกำหนดให้ฟิล์มต้องมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและอัตราการยืดตัวสูงสุด จะได้ปริมาณกลีเซอรอลและคาราจีแนนที่เหมาะสมคือ 16.14 และ 1.29% ของน้ำหนักสตาร์ชตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสังเคราะห์จากพลาสติกสามชนิดได้แก่ พอลีเอทิลีน (polyethylene) พอลีโพรไพลีน (polyporpylene) และเซลโลเฟน (cellophane) พบว่าฟิล์มบริโภคได้ดังกล่าวมีคุณสมบัติเด่นคือมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่า แต่มีข้อด้อยคือมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ต่ำกว่า ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปบรรจุห่อหุ้มอาหารที่มีความชื้นสูง อย่างไรก็ตามอาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ชั้นในเพื่อบรรจุหรือห่อหุ้มอาหารแห้งโดยเฉพาะอาหารที่มีส่วนประกอบของไขมันสูง เนื่องจากน่าจะช่วยชะลอการเหม็นหืนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจนได้ดี ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการป้องกันความชื้นของฟิล์มต้นแบบดังกล่าวเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นแผ่นฟิล์มบรรจุอาหารได้หลากหลายชนิดมากขึ้น

Abstract

In comparing the film forming properties among three rice materials including rice flour, native rice starch and hydrothermal treated rice starch with 31.04-33.75% amylose content, hydrothermal treated rice starch exhibited the best film forming properties as it gave the gel with the highest strength and clarity. In order to formulate and optimize the formulation of film, film suspension was prepared from 2.5% w/w hydrothermal treated rice starch, as the main film forming agent. The eleven film formulas based on central composite design were employed to study the effect of two additives, glycerol (10, 20 and 30% starch) and carrageenan (0.5, 1.0 and 1.5% starch) on physical and mechanical properties of film. Results showed that glycerol and carrageenan did not affect morphology of the derived film as observed by neither SEM nor XRD. The polynomial equations obtained from Multiple Regression Analysis showed the significant effects of the two additives on physical and functional properties including moisture content (R^2=79.56%) lightness (L*) (R^2=78.67%) redness (a*) (R^2=95.11%) total color difference (R^2=78.57%) thickness (R^2=68.31%) tensile strength (R^2=90.51%) elongation (R^2=78.97%) and water vapor transmission rate (R^2=74.37%). However, glycerol and carrageenan posed no significant effects on yellowness, opacity, transparency and gas transition rate of film. The Response Surface Methodology was used to obtain the optimal film formulation with maximum tensile strength and elongation. The optimum combination between the two additives was glycerol 16.14% starch and carrageenan 1.29% starch. The derived film showed the good protective property against oxygen. However, the film had a poor protective property against water vapor when compared to plastic films, polyethylene, polypropylene and cellophane. Therefore, the potential uses of the film were to be applied for dried food in particular food with high fat content. The film might possibly help in retarding lipid oxidation from the surrounding oxygen. The derived film needed to be improved on the protective properties against water and moisture to be applicable for various food products.

สารบัญ

สารบัญตาราง

หน้า

สารบัญภาพ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ประเทศไทยผลิตข้าวเพื่อบริโภคภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ และมีการส่งออกข้าวปีละประมาณ 7-9 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 40 ของปริมาณที่ผลิตได้ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) ผลผลิตข้าวที่บริโภคอยู่ในรูปข้าวสุกหุงบริโภคหรือผลิตภัณฑ์แปรรูปจากข้าวชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์อาหารจากข้าวยังมีมูลค่าโดยรวมไม่สูงมากนัก ในปัจจุบันมีแนวโน้มในการสกัดเอาองค์ประกอบเฉพาะส่วน เช่น สตาร์ช โปรตีนและไขมันดังกล่าวจากธัญพืช พืชหัว และพืชตระกูลถั่ว เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในแง่ที่เป็น functional ingredient ในอุตสาหกรรมอาหารเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการสกัดแป้งหรือสตาร์ชจากข้าวและการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากแป้งหรือสตาร์ชข้าวเพื่อเพิ่มมูลค่าและการใช้ประโยชน์ ยังมีการศึกษาวิจัยค่อนข้างน้อย

มีความเป็นไปได้ในการนำแป้งและสตาร์ชข้าวมาเตรียมเป็นฟิล์มชนิด starch based film ซึ่งสามารถบริโภคได้และสามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวเคมีจึงมีข้อดีที่เหนือกว่าฟิล์มพลาสติกโดยทั่วไป (Burttuzzi et al., 2007) และยังเหนือกว่าฟิล์มโพลีเมอร์ธรรมชาติจากสัตว์ เช่น เจลาตินหรือไคโตซาน เนื่องจากปราศจากโปรตีนที่อาจก่อให้เกิดอาการภูมิแพ้ในผู้บริโภคบางราย (Woltjet et al., 1999) ฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากแป้งและสตาร์ชของพืชนี้ ยังสอดรับกับความต้องการของผู้บริโภคกลุ่มที่เป็นมังสวิรัติที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในยุคปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเฉพาะดังต่อไปนี้

1. เพื่อทราบคุณภาพด้านกายภาพ เคมี คุณสมบัติเชิงหน้าที่ และคุณสมบัติในการก่อฟิล์มของแป้งและสตาร์ชข้าว
2. เพื่อพัฒนาสูตรการเตรียมฟิล์มจากแป้งและสตาร์ชข้าว โดยการเติมสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม และสารกลุ่มพลาสติไซเซอร์
3. เพื่อทราบคุณภาพของฟิล์มบริโภคได้จากแป้งและสตาร์ชข้าว และทราบแนวโน้มในการพัฒนาคุณภาพฟิล์มให้สอดคล้องกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้จะทำให้ทราบองค์ความรู้พื้นฐานด้านโครงสร้างและคุณสมบัติการก่อเจลของแป้งและสตาร์ชจากข้าว ทราบสูตรที่เหมาะสมของการเตรียมฟิล์มจากแป้งและสตาร์ชดังกล่าวร่วมกับสารเสริมคุณภาพอื่นๆ ได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม และพลาสติไซเซอร์ และทราบผลของสารดังกล่าวต่อคุณสมบัติแป้งและสตาร์ช ทำให้ทราบข้อมูลพื้นฐานที่เสริมความรู้และความเข้าใจในกลไกและผลของปฏิกิริยาร่วมระหว่างโพลีเมอร์ต่างชนิด ซึ่งสนับสนุนความก้าวหน้าในเชิงวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของสตาร์ช ทราบคุณสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้จากข้าว ซึ่งนำไปสู่การประเมินศักยภาพในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดเป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อเพิ่มมูลค่า สร้างโอกาสในการเพิ่มรายได้แก่เกษตรกรผู้ปลูกและส่งเสริมการเติบโตทางเศรษฐกิจในภาพรวมของประเทศ

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานด้านโครงสร้าง กายภาพ เคมี และคุณสมบัติการก่อเจลของแป้งและสตาร์ชจากข้าว และพัฒนาสูตรการเตรียมฟิล์มที่ใช้แป้งหรือสตาร์ชดังกล่าวเป็นส่วนประกอบหลัก ร่วมกับสารเสริมคุณภาพได้แก่ ไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม และพลาสติไซเซอร์ และสรุปอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความแข็งแรงและยืดหยุ่นของฟิล์มที่เตรียมได้ ร่วมกับคุณภาพแง่อื่นๆ

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทางเคมี-กายภาพของข้าว

ข้าว (*Oryza sativa*) ประกอบไปด้วยสตาร์ชมากกว่า 90% โดยแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) (Juliano, 1984) ซึ่งชนิดและสัดส่วนของแป้งทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวกำหนดคุณภาพการหุงของเมล็ดข้าว ได้แก่ อุณหภูมิที่แป้งข้าวสุก การดูดน้ำ การขยายตัว และคุณภาพด้านประสาทสัมผัส เช่น ข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสสูงกว่า 25% เมื่อหุงสุกจะนุ่มและร่วน ในขณะที่เมล็ดข้าวเหนียวที่มีอะไมโลสต่ำเพียง 2-7% จะนุ่มและเหนียวเกาะติดกัน ส่วนประกอบอื่นของเมล็ดข้าว ได้แก่ โปรตีนประมาณ7-8% ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนชนิดกลูเตลิน (glutelin) โปรตีนในแป้งข้าวเป็นโปรตีนที่ก่อให้เกิดการแพ้ได้น้อยเมื่อเทียบกับโปรตีนกลูเตน (gluten) ที่พบมากในข้าวสาลี (Shih และ Daigle, 1999) เมล็ดข้าวยังประกอบด้วยไขมันในปริมาณน้อยเพียง 0.50 % โดยปกติโปรตีนและไขมันมักรวมตัวกับเส้นสายอะไมโลส เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ยับยั้งการพองตัวและการให้ความหนืดของเม็ดแป้ง (Juliano, 1984)

2.2 แป้งข้าว (rice flour)

ได้จากการบดลดขนาดเมล็ดข้าวลงจนเป็นอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 150-180 ไมครอน ดังนั้นจึงมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกันหรือเทียบเท่ากับเมล็ดข้าวทุกประการ มีการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวอย่างหลากหลายในอุตสาหกรรมอาหาร โดยในกระบวนการผลิต แป้งจะถูกให้ความร้อนจนสุกแล้วจึงถูกทำให้เย็นตัวลง แป้งข้าวที่มีอะไมโลสต่างกันจะมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ต่างกัน อาทิ เช่น ช่วงอุณหภูมิของการเกิด gelatinization ความข้นหนืด ลักษณะและการก่อเจล ความใส ความทนทานต่อแรงเฉือน ด้วยเหตุนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่างกัน แป้งข้าวเจ้าอะไมโลสสูงมักให้เจลที่แข็งและมีความคงตัวสูง จึงเหมาะกับการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เส้น เช่น ก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ และขนมต่างๆ ส่วนแป้งข้าวเหนียวมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยกว่าแป้งข้าวเจ้า (Juliano et al., 1987)

2.3 สตาร์ชข้าว (rice starch)

ได้จากการสกัดเอาโปรตีนและไขมันออกไปจากแป้งจนเหลืออยู่น้อยกว่า 1% (Juliano, 1984) สตาร์ชข้าวที่มีอะไมโลสต่างกันจะมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ต่างกัน อาทิ เช่น ช่วงอุณหภูมิของการเกิด gelatinization ความข้นหนืด ลักษณะและการก่อเจล ความใส ความทนทานแต่แรงดึง ด้วยเหตุนี้จึงมีความเหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่างกัน สตาร์ชข้าวเจ้าอะไมโลสสูงมักให้เจลที่แข็งและมีความคงตัวสูง และมีความสามารถก่อฟิล์มได้ดี ส่วนสตาร์ชที่มีอะไมโลสต่ำ หรือไม่มีอะไมโลสเลย ได้แก่ สตาร์ชข้าวเหนียว เมื่อต้มสุกจะให้น้ำแป้งที่ข้นเหนียว แต่ไม่สามารถก่อเจลที่คงตัวได้ (Juliano et al., 1987)

พบว่าสตาร์ชธรรมชาติมักขาดความเหมาะสมบางประการในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ไม่ละลายในน้ำเย็น เกิดการสูญเสียความข้นหนืดอย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงมีการนำสตาร์ชไปดัดแปรด้วยวิธีการต่างๆเพื่อปรับปรุงคุณภาพเชิงหน้าที่ดังกล่าวให้ดีขึ้น การดัดแปรสตาร์ชอาจทำได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น ใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น วิธีทางเคมีโดยใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติออกซิไดซ์ ก่อพันธะแบบเชื่อมข้าม และวิธีทางชีวเคมีโดยใช้เอนไซม์ (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546)

2.4 ฟิล์มบริโภคได้ (Edible film)

ปัจจุบันมีแนวโน้มในการนำฟิล์มที่บริโภคได้ (edible film) มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพิ่มมากขึ้น โดยฟิล์มดังกล่าวนี้สามารถเตรียมได้จากองค์ประกอบกลุ่มต่างๆในพืชและสัตว์ ได้แก่ พอลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) โปรตีน และไขมัน (Arvanitoyannis & Biliaderis, 1999; Krochta, 2002; Thranathan, 2003) นอกจากนี้ยังอาจเตรียมจากการผสมสารดังกล่าวเข้าด้วยกันได้เป็นฟิล์มผสม (composite film)

ในสารกลุ่มพอลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) สตาร์ชนับเป็นสารที่มีการนำมาเตรียมเป็นฟิล์มบริโภคได้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่าย มีปริมาณมาก และมีราคาถูก สตาร์ชสามารถก่อเจลและขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี ฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชสามารถป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี และมีความแข็งแรงสูงเทียบเท่าฟิล์มพลาสติกบางชนิด (Forssell et al., 2002; Gilleland et al, 2001; Lawton 1996) ฟิล์มจากสตาร์ชยังสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่นเดียวกับฟิล์มที่เตรียมจากสารกลุ่มโปรตีนและไขมัน

2.5 การเตรียมฟิล์มจากสตาร์ช (Starch based film preparation)

ในกระบวนการเตรียมฟิล์มจากสตาร์ชจำเป็นต้องให้ความร้อนจนแป้งสุก (gelatinization) โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นๆ คือ อนุภาคสตาร์ชจะเกิดการดูดน้ำ พองตัว และเมื่อมีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนสูงเกินค่าอุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature) อนุภาคสตาร์ชจะแตกตัว และโมเลกุลของอะไมโลสจะแพร่ออกมาสู่สารละลาย ในแง่ของวิทยาศาสตร์โพลีเมอร์ ความร้อนจะไปทำลายโครงสร้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของสตาร์ชจากสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) ให้กลายเป็นสารไร้ผลึกหรืออสัณฐาน (amorphous) และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Liu et al., 2009) ซึ่งเมื่อถูกทำให้เย็น สายโพลีเมอร์ของอะไมโลสจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (retrogradation or recrystalization) ได้เป็นโครงสร้างเจลที่อุ้มโมเลกุลของน้ำไว้

โดยทั่วไปแล้วสตาร์ชที่นำมาใช้เตรียมเป็นฟิล์มจึงต้องมีปริมาณอะไมโลสสูง เนื่องจากอะไมโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดเจลหรือโครงสร้างฟิล์มที่แข็งแรงและคงตัว (Bertuzzi et al., 2007; Bae et al 2008) ในขณะที่อะไมโลเพคตินซึ่งมีโครงสร้างแตกแขนงจะให้ฟิล์มซึ่งมีความเปราะบางและไม่คงตัว (Mali et al., 2003)

การขึ้นรูปฟิล์มจากสตาร์ชสามารถทำได้สองวิธีหลักๆ คือ วิธีขึ้นรูปแบบ (1) Thermoplastic และ (2) Solution casting โดยวิธีแรกจะเป็นการนำเอาเทคโนโลยีการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกมาใช้ เช่น การใช้วิธี Extrusion Injection หรือ Compressing ซึ่งมักจะมีความซับซ้อนและควบคุมยากกว่าการเตรียมจากพลาสติก (Liu et al., 2003) ในขณะที่วิธีที่สองมีความซับซ้อนน้อยกว่านั่นคือทำโดยเตรียมสารละลายของสตาร์ชในน้ำ แล้วให้ความร้อนเพื่อให้เกิดเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์ จากนั้นนำไปเทลงในแม่พิมพ์ที่มีพื้นผิวเรียบแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง เมื่อให้ความร้อนและโมเลกุลของน้ำระเหยไปจะได้เป็นแผ่นฟิล์มที่คงตัวเนื่องจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสายโพลีเมอร์อะไมโลส (Lourdin et al., 1995)

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มโดยวิธี Casting จากสตาร์ชจากแหล่งต่างๆ ได้แก่สตาร์ชข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูง (high amylose corn starch) สตาร์ชและแป้งข้าว สตาร์ชมันสำปะหลัง มันฝรั่ง สวีทโพเทโท อมาแรนท์ บัควีท ข้าวสาลี ถั่วเขียว เป็นต้น โดยได้สรุปรายละเอียดในการเตรียมฟิล์มจาก

สตาร์ชไว้ดังตาราง 2-1 โดยภาพรวมของงานวิจัยดังกล่าวพบว่า คุณสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งภายในและภายนอก ปัจจัยภายในได้แก่คุณสมบัติของสตาร์ช เช่นสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุล ขนาดและความยาวของสายโซ่อะไมโลส การจัดเรียงตัวของสายโซ่ ความเป็นผลึก เป็นต้น ในขณะที่ปัจจัยภายนอกได้แก่สภาวะการเตรียมฟิล์ม เช่น ความเข้มข้นของสตาร์ช ชนิดและปริมาณสารปรับปรุงคุณภาพฟิล์ม (film additives) อุณหภูมิและเวลาในการทำให้สตาร์ชเกิด gelatinization อัตราการคน (shearing) และการลดความชื้น (Liu et al., 2003) ในงานวิจัยที่เน้นศึกษาที่องค์ประกอบของฟิล์มจึงต้องเลือกวิธีการเตรียมฟิล์มที่เป็นมาตรฐานและมีการควบคุมอย่างเข้มงวดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบจากวิธีการเตรียมฟิล์ม

ตาราง 2-1 การเตรียมฟิล์มจากสตาร์ช

Film forming dispersion	Plasticizer	Other additives	Preparing film forming solution	Drying	Conditioning	References
3% Cassava starch	Glycerol and Sorbitol 25, 30 and 35% dry starch	-	Heating 80 C under constant stirring	40 C for 12 hrs in an oven with air circulation	25 C 58% RH (using saturated Sodium bromide) for 48 hrs	Muller et al., Carbohydrate polymer 72 (2008), 82-87
5% Cassava starch	Glycerol, Xylitol and Sorbitol 20-60% dry starch	-	Heating 90 C and kept for 5 min before cool down to 50 C	37 C for 4 hrs in an oven	Equilibrated in dessicator over sat solutions of MgCl2. Mg (NO3) and NaCl which give RH of 33, 54 and 76%, respectively for 7 days	Talja et al., Carbohydrate polymer 767 (2007), 288-295
5% Rice flour or starch	Glycerol and Sorbitol 20 and 30% dry starch	For preparation of rice flour film, Ph was adjusted to 10 with 0.1 N NaOH to promote protein solubilization	Heating 85 C under constant stirring for 1 hr	30 C for 14 hrs in an oven with air circulation		Dias et al., J. of Cereal Sci 51 (2010), 213-219
3% Banana, maize, potato and sagu starch	Glycerol 0 and 50% dry starch	-	Heating 98 C for 30 min stirring under constant stirring	4 C for 10 days in refrigerator) followed by 40 C for 4 hr	Place in desicator with silica gel before milling and doing RS analysis	Hernandez et al., Carbohydrate polymer 71 (2008), 648-655

ตาราง 2-1 การเตรียมฟิล์มจากสตาร์ช (ต่อ)

Film forming dispersion	Plasticizer	Other additives	Preparing film forming solution	Drying	Conditioning	References
4% Cassava starch	-	-	Heating 70-100C at low and high shear rate	27C for 24 hr in a convection oven	Pre dried in P2O5 and equilibrated at 25c and RH of 32, 44, 58 and 69%, respectively for 7 days	Paes et al., Food Hydrocolloids 22 (2008), 788-797
2% Potato starch	Glycerol 20% dry starch	Surfactant Tween20, Span 80 and soy lecithin 0.5 or 50% dry starch added after heating and followed with homogenization (use vacuum to remove dissolved air)	Heating 70C for 30 min in water bath and stirring under constant stirring	60 C and 60% RH in a climatic chamber for 24 hr	For tensile properties testing, film was equilibrated using NaCl to 75% RH. For WVP determination, film was equilibrated using silica gel to 0% RH.	Rodriquez et al., Food Research International 39 (2006), 840-846
2.2-2.6 % high amylase maize starch	Glycerol 0 and 34% dry starch	-	Autoclaving 140-150C for 5,15 and 30 min, cooling at RT and being stirred to 80 C	23 C and 50% RH	-	Koch et al., Int J of Bio Macromolecules 46 (2010), 13-19

ตาราง 2-1 การเตรียมฟิล์มจากสตาร์ช (ต่อ)

Film forming dispersion	Plasticizer	Other additives	Preparing film forming solution	Drying	Conditioning	References
Approx 3.87% corn starch	Glycerol 13-27% dry starch	Methyl cellulose solubilised in water-ETOH mixture (2/1 v/v) 0-60%	Heating starch at 95 C for 30 min then mixed with others and then held at 75C for 1 min then cooled to 40 C	none	-	Peressini et al., J of Food Eng 59 (2003) 25-32
6% Waxy and non-waxy rice starch (medium and high AM)	Glycerol 1.4% dry starch	Na-Methyl cellulose 1-2% (Dry heat treatment with stacrh)	Heating at 95 C for 10 min then mixed with others and then held for 10 min before cooled to 40 C	RT till constant weight	Equilibrated in various RH according to D828-8 (ASTM)	Li et al.,
Modified pea starch (HPPS)	None	K carageenan (with KCl) 0.1-1%	Heating at 90 C for 30 min (K carageenan is solubilised in water before adding)	25 C and 40% RH	-	Larfargue et al., Carbo Polymer70 (2007) 11-111
0.5-2% rice starch	Sorbitol 40%	Chitosan 1% solubilized in Acetic acid and filtered to remove lump	Heating at 85 C for 5 min then cooled to 27C before adding chitosan solution and sorbitol	55C for 1 h then cooled to RT	Equilibrated in dessicator at 60 %RH (over sat Mg (NO3)2 for 3 days)	Bourtoom and Chinnan, LWT 41(2008)1633-1641

ตาราง 2-1 การเตรียมฟิล์มจากสตาร์ช (ต่อ)

Film forming dispersion	Plasticizer	Other additives	Preparing film forming solution	Drying	Conditioning	References
0.5-2% Waxy and regular corn starch	Glycerol 25%	Citosan 1-100% solubilized in lactic acid and filtered to remove lump	Heating to gelatinized then cooled to 25C before adding chitosan solution and glycerol	RT for atleast 3 days	Equilibrated in dessicator at 50 %RH for 2 days)	Xu et al., Industrial crops and products 21(2005) 185-192
4% Amarant flour	Glycerol	Ph was adjusted to 10 with 0.1 N NaOH to dissolve protein	Heating to gelatinized		Equilibrated in dessicator at 58%RH	Tapia et al.,j OF Food Eng 67 (2005) 215-223
2, 5, 8% Maize starch (waxy non-waxy, high AM. Modified, pre-gelled)	-		Heating to gelatinized90 C for 2 hr Heating to gelatinized 90 C for 15 min and autoclaved 2 times	23 C and 60% RH	-	Pegella et al., Ichem 80 n(2002)
4% Modified corn starch	Glycerol 0-5%			50 C in a ventilated oven to constant weight	Stored in 65 %RH in controlled room	

2.6 คุณสมบัติของฟิล์มจากสตาร์ช

เนื่องจากโมเลกุลสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณมากจึงมีคุณสมบัติชอบน้ำ ฟิล์มจากสตาร์ชจึงดูดซับน้ำหรือความชื้นได้ดี ส่งผลทำให้ความแข็งแรงและความคงตัวของฟิล์มลดลง (Miller and Krocha, 1997) กล่าวได้ว่าความชื้นเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านการป้องกันของฟิล์มจากสตาร์ช โดยพบว่าที่ภาวะความชื้นต่ำฟิล์มจะมีความเปราะแต่ในภาวะความชื้นสูงฟิล์มจะมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นแต่อาจสูญเสียความแข็งแรงและความสามารถด้านการป้องกันของฟิล์มไป ดังนั้นจึงมีการดัดแปรคุณสมบัติสตาร์ชเพื่อให้เหมาะสมต่อการทำเป็นฟิล์ม ด้วยวิธีการดัดแปรทางเคมี กายภาพ และเอนไซม์ (Bemiller, 1997) นอกจากนี้ยังมักมีการเติมสารเสริม (additives) ชนิดต่างๆ ในสูตรการเตรียมฟิล์ม เพื่อให้ได้ลักษณะของฟิล์มบริโภคที่พึงประสงค์คือ มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูง (Arvanitoyannis & Biliaderis, 1999)

2.7 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

ได้แก่สารกลุ่มพอลีออล (polyol) (polyol) ต่างๆ เช่น กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และโพลีเอทธิลีนไกลคอล สารกลุ่มดังกล่าวนี้จะไปลดการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของเส้นสายโพลีเมอร์ และทำให้เฟสเคลื่อนไหว (mobile region) ของสายโพลีเมอร์ภายในฟิล์มสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นแต่มีความแข็งแรงลดลง (Psomiadou et al., 1996) สารกลุ่มนี้ยังส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันของน้ำหรือความชื้น เนื่องจากตัวมันเองมีคุณสมบัติดูดน้ำ (Carmen et al, 2008)

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมสารกลุ่มพลาสติไซเซอร์ในฟิล์มบริโภคได้จากสตาร์ช ดังนี้

Dias et al (2010) เปรียบเทียบคุณภาพฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชและแป้งข้าว โดยเตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 5% ในน้ำ และเติมสารเสริมคือกลีเซอรอลและซอร์บิทอลในปริมาณ 20% และ30% ของน้ำหนักแป้ง ตามลำดับ พบว่าฟิล์มแป้งข้าวมีคุณสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับฟิล์มสตาร์ชข้าวแต่มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability) สูงกว่าถึงสองเท่า นอกจากนี้ยังพบว่าสารเสริมทั้งสองชนิดทำให้ฟิล์มมีคุณภาพต่างกัน โดยซอร์บิทอลให้ฟิล์มที่เปราะกว่าและมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่าในขณะที่กลีเซอรอลทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นดีกว่า

Carmen et al (2008) ศึกษาผลของการเติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ในฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังโดยเตรียมเป็นสารละลายความเข้มข้น 3% w/w ในน้ำ และเติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลในปริมาณ 25, 30 และ35% ของน้ำหนักแป้ง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารทั้งสองชนิดทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยที่กลีเซอรอลให้ผลชัดเจนกว่าซอร์บิทอล

Bertuzzi et al (2007) ทดลองเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-60% ของน้ำหนักแป้ง พบว่าที่ปริมาณ 30% ขึ้นไปทำให้โครงสร้างฟิล์มหลวม ได้ฟิล์มที่ขุ่นและดูดน้ำมากขึ้น

Talja et al (2007) ศึกษาผลของการเติมกลีเซอรอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล ในสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่าการเพิ่มปริมาณพลาสติไซเซอร์ในสารละลาย ทำให้ปริมาณน้ำในฟิล์มและความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้ความยืดหยุ่นของฟิล์มเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง โดยผลดังกล่าวเห็นได้ชัดในกลีเซอรอลในขณะที่ซอร์บิทอลให้ผลน้อยที่สุด นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติฟิล์มที่เกิดจากการเติมซอร์บิทอลและไซลิทอลอาจเป็นผลมาจากการแยกเฟสของส่วนผสม

Olivia et al (2008) รายงานผลของการเติมกลีเซอรอลว่าอาจให้ผลได้ทั้งสองทาง กล่าวคือสามารถเพิ่มหรือลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มได้ กรณีแรกเนื่องจากกลีเซอรอลจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติดูดน้ำ (hydrophilic) จึงเพิ่มการซึมผ่านของไอน้ำ กรณีหลังเนื่องจากกลีเซอรอลไปรบกวนการจัดเรียงตัวของเส้นสายโพลีเมอร์สตาร์ช ทำให้โครงสร้างฟิล์มแน่นและลดการซึมผ่านของไอน้ำ

ฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง จะมีค่าความเป็นผลึกสูง (Garcier et al., 2000) Rindalv et al (1997) รายงานว่าการเตรียมฟิล์มในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูงในการระเหยน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความเป็นผลึกต่ำ การเติมพลาสติไซเซอร์ในสูตรการเตรียมฟิล์มจะทำให้ค่าความเป็นผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมพลาสติไซเซอร์ (Garcier et al., 2000) Arvanitoyannis et al. (1996) อธิบายว่าการเติมพลาสติไซเซอร์จะลดแรงยึดเกาะระหว่างเส้นสายพอลิเมอร์ จึงช่วยลดค่าอุณหภูมิ glass transition ของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าสารกลุ่มพลาสติไซเซอร์นี้ส่งผลต่อคุณภาพด้านอื่นๆของฟิล์มได้แก่ความสามารถในการดูดและคายความชื้น (Bertuzzi et al., 2007) นอกจากนี้ยังส่งผลต่อความสามารถในการย่อยโดยเอนไซม์ และคุณภาพด้านประสาทสัมผัส (Hernandez et al., 2007) อีกด้วย

2.8 ไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม (Hydrocolloid or gum)

ไฮโดรคอลลอยด์หมายถึงสารประกอบประเภทกัม (gums) ซึ่งมีโมเลกุลเป็นโพลีเมอร์ที่มีสายยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซี่ (-OH) ปริมาณมาก จึงมีคุณสมบัติชอบน้ำ เมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำจะช่วยทำให้น้ำมีความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีลักษณะเป็นเจล นอกจากนั้นยังทำหน้าที่เกี่ยวข้องเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) และสารทำให้เกิดความคงตัว (stabilizer) ในผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นต้น (นิธิยา, 2534) ไฮโดรคอลลอยด์ที่มักใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่สารสกัดจากพืชและสัตว์ เช่น กัวร์กัม โลคัสบีนกัม คาร์ราจีแนน ไคติน แซนแทนกัม อนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น Carboxy methyl cellulose (CMC) หรือไฮโดรคอลลอยด์สังเคราะห์ เช่น โพลีเอธิลีนออกไซด์พอลิเมอร์ (polyethylene oxide polymers) การเติมสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์หรือกัมชนิดต่างๆสามารถดัดแปรคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และคุณสมบัติเชิงหน้าที่

ของสตาร์ชได้ ดังมีรายงานผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์หรือกัมในฟิล์มบริโภคได้จากสตาร์ชดังนี้

Li et al (2008) ศึกษาผลของการเติมคาร์บอกซีเมทธิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose; CMC) ในสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่างกัน โดยผสมและให้ความร้อนแห้งเพื่อให้เกิด cross-linking ระหว่างกัน พบว่า CMC ทำให้สตาร์ชมีความข้นหนืดสูงขึ้น และทำให้ได้ฟิล์มที่มีความต้านทางแรงดึงสูงขึ้น แต่ทำให้อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำผ่านฟิล์มลดลง

Gilleland et al (2001) รายงานว่าการเติมสารผสมระหว่าง K-carrageenan และ I-carrageenan ในอัตราส่วน 1:1 สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของฟิล์มได้มากกว่าการเติม K-carrageenan เพียงอย่างเดียว และทำให้ความข้นหนืดของสารละลายสตาร์ชลดลง

Larfargue et al (2007) เตรียมฟิล์มจากสตาร์ชถั่วที่ผ่านการโมดิฟายโดยวิธี Hydroxypropylated และย่อยบางส่วนด้วยกรด ผสมกับ K-carrageenan ในอัตราส่วนต่างๆ แต่รักษาระดับของ K+ ให้คงที่ในทุกอัตราส่วนผสม พบว่า ในระหว่างที่ให้ความร้อน ส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก และเมื่อเย็นตัวลงได้เจลที่มีความแข็งแรงสูงมากกว่า K-carrageenan เพียงอย่างเดียว และพบว่าเจลที่เตรียมได้สามารถหลอมตัวได้ใหม่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น 10 และ 20 องศาเซลเซียส แสดงว่ามีคุณสมบัติ Thermoreversible

ฟิล์มที่ได้จากการผสมสตาร์ชร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์หรือกัมชนิดต่างๆ อาจเรียกได้ว่าเป็นการผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดเข้าด้วยกัน ทำให้มีความแตกต่างและหลากหลายในคุณสมบัติเชิงกลซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกัน

2.9 ข้อสรุปจากการทบทวนวรรณกรรม

โดยสรุปจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ พบว่าฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากสตาร์ช (starch based film) มักเตรียมมาจากสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เนื่องจากอะไมโลสเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการก่อเจลที่คงตัวภายหลังจากการเกิดเจลาติไนเซชั่นและรีโทรเกรดเดชั่น จึงมีความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มบริโภคได้จากแป้งหรือสตาร์ชข้าวที่มีค่าอะไมโลสสูง (>25%) ซึ่งเป็นวัตถุดิบราคาถูกที่มีปริมาณมากในประเทศไทย โดยเบื้องต้นจำเป็นต้องวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานด้านเคมี กายภาพ และความสามารถในการขึ้นฟิล์มของแป้งและสตาร์ชข้าวดังกล่าว อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟิล์มที่เตรียมจากแป้งหรือสตาร์ชมักมีข้อด้อยคือดูดความชื้นได้ง่ายเนื่องจากมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophillic) ทำให้ความแข็งแรงและความสามารถในการป้องกันลดลง จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเสริมคุณภาพบางชนิดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการทดลองเติมสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์และพลาสติไซเซอร์ชนิดต่างๆพบว่าช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของฟิล์มได้อย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกนำสารเสริมคุณภาพดังกล่าวบาง

ชนิดมาใช้ในการเตรียมฟิล์มจากแป้งและสตาร์ชข้าว และวัดคุณภาพด้านต่างๆที่เป็นผลมาจากการเติมสารเสริมคุณภาพดังกล่าว และสรุปให้ได้ชนิดและปริมาณที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นฟิล์มที่มีคุณภาพยอมรับได้

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้

3.1 ศึกษาคุณภาพด้านกายภาพ เคมี คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของ และคุณสมบัติในการก่อฟิล์มของแป้งและสตาร์ชข้าว

1) เตรียมวัตถุดิบ ประกอบด้วย

- แป้งข้าวเจ้า (native rice flour)
- สตาร์ชข้าวเจ้า (native rice starch)
- สตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปร (hydrothermal treated rice starch) ใช้สตาร์ชข้าวเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น และทำการดัดแปรด้วยวิธี Heat moisture treatment ตามวิธีของ Hormdok & Noomhotm (2007) โดยนำสตาร์ชข้าวเจ้ามาปรับความชื้นให้ได้เท่ากับ 25% จากนั้นนำไปบรรจุในหลอดทดลองและปิดฝาให้สนิท นำไปให้ความร้อนภายใต้แรงดันในเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที นำสตาร์ชที่ได้ไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 10% นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh และเก็บในถุงพลาสติกโพลีเอทธิลีนที่ปิดสนิท

2) ตรวจวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

2.1) การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis)

- ปริมาณความชื้น ตามวิธีมาตรฐาน 44-16 (AACC,1999) นำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- ปริมาณโปรตีน ตามวิธีมาตรฐาน 44-10 (AACC, 1999) นำตัวอย่างไปย่อยด้วยกรด กลั่นและจับแอมโมเนียที่เกิดขึ้นด้วยสารละลายกรดบอริก นำไปไตเตรทหาปริมาณไนโตรเจนคูณด้วย 5.95
- ปริมาณไขมัน ตามวิธีมาตรฐาน 30-10 (AACC, 1999) นำตัวอย่างหลังจากการอบแห้งกำจัดความชื้นแล้วมาสกัดไขมันโดยสารละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในเครื่อง Soxtec แล้วชั่งน้ำหนักของสารที่สกัดได้ภายหลังการอบแห้ง

- ปริมาณเถ้า ตามวิธีมาตรฐาน 08-10 (AACC, 1999) นำตัวอย่างไปเผาในตู้อบที่อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส
- ปริมาณอะไมโลส โดยวิธีทำให้เกิดสีกับไอโอดีน (Juliano, 1971) นำสารละลายตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร คำนวณปริมาณอะมิโลสในตัวอย่างโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของอะมิโลสจากมันฝรั่ง

2.2) คุณภาพด้านกายภาพ

- สี โดย ColorQuestXE ในหน่วย CIE ค่าสี L คือความสว่าง ค่าสี a คือสีเขียว(-) และสีเหลือง(+) ค่าสี b คือสีน้ำเงิน(-) และสีเหลือง(+)
- ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคโดย เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) นำตัวอย่างสตาร์ชมาละลายในเอธานอล ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 ใช้หลอดหยดดูดมาหยดบนแผ่นอลูมิเนียมที่ยึดเกาะโดยเทปกาวสองด้าน จากนั้นนำไปเคลือบทอง:พาลาเดียม (60:40) แล้วนำไปตรวจวัด ขนาดและรูปร่างของอนุภาคแป้ง
- ความเป็นผลึกโดย X-ray diffraction (XRD) นำตัวอย่างสตาร์ชมาตรวจวัดด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ด้วยความเร็วในการแสกน 2 องศาต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง สังเกตตำแหน่งของพีคที่องศาต่างๆ

2.3) คุณสมบัติเชิงหน้าที่

- ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility) ตามวิธีที่ปรับปรุงจาก Singh et al (2004) นำตัวอย่างที่มีน้ำหนักแห้ง 5 กรัม ผสมในน้ำกลั่น 75 มล. คนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชม. แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000g เป็นเวลา 10 นาที เดรนน้ำส่วนเกินทิ้ง เป็นเวลา 10 นาที แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลืออยู่
- ความขุ่น (Turbidity) ตามวิธีของ Peara and Hoover (1999) นำตัวอย่างมาผสมในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 1% w/w ให้ความร้อน ที่ 90 องศาเซลเซียส โดยคนผสมอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 ชม. ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชม. จากนั้นนำตัวอย่างไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม นำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร

- ความหนืด โดยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) นำตัวอย่าง 3 กรัม (คำนวณที่ความชื้นร้อยละ 14) ใส่ในกระบอกวัด เติมน้ำให้ได้น้ำหนักรวม 28 กรัม วัดความหนืดที่เกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อนและถูกทำให้เย็นลง ตามวิธี standard 1 (Newport Scientific, 1995)
- อุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลลาติไนซ์ โดย Differential Scanning Calorimetry (DSC) นำตัวอย่าง 3 มิลลิกรัม ชั่งใส่ในตลับโลหะสำหรับวัด เติมน้ำ 10 ไมโครลิตร ปิดฝาสนิททิ้งให้น้ำแทรกซึมในตัวอย่างทั่วถึง ให้ความร้อนตั้งแต่ 30-130 องศาเซลเซียส อ่านค่าอุณหภูมิขณะเกิดเจลาติไนซ์ทั้งค่าเริ่มต้น (onset) ค่าสูงสุด (peak) และค่าสุดท้าย (conclusion) และพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์
- เนื้อสัมผัสของเจล โดย Texture analyzer นำตัวอย่างมาผสมในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 6% w/vให้ความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียส โดยคนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที ถ่ายตัวอย่างจำนวน 40 มล. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มล จากนั้นทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำตัวอย่างไปเก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เจลที่แข็งตัวอยู่ในบีกเกอร์จะถูกนำมาวัดเนื้อสัมผัสโดยตรงด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) ค่าที่ทำการตรวจวิเคราะห์คือ Hardness, Cohesiveness, Adhesiveness, Springiness, Gumminess and Chewiness

3.2 การพัฒนาสูตรการเตรียมฟิล์มจากแป้งหรือสตาร์ชข้าว ร่วมกับสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์และสารกลุ่มพลาสติไซเซอร์

1) ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกแป้งข้าว สตาร์ช และสตาร์ชดัดแปรอย่างใดอย่างหนึ่ง มาเตรียมเป็นฟิล์ม

2) หาปริมาณที่เหมาะสมของสารปรับปรุงคุณภาพฟิล์มได้แก่ คาราจีแนน และพลาสติไซเซอร์ ได้แก่กลีเซอรอล โดยวางแผนการทดลองแบบ Central composite design โดยสารแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 3 ระดับ ซึ่งให้รหัสดังนี้ -1 (ต่ำ), 0 (ปานกลาง), และ 1(สูง) และมีการทำทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง (Central point) รวม 3 ซ้ำ รวมทั้งหมดเป็น 11 สิ่งทดลอง ดังตาราง 3-1

ตาราง 3-1 อัตราส่วนของแป้งหรือสตาร์ชข้าว ไฮโดรคอลลอยด์ และพลาสติไซเซอร์ในการเตรียมสารละลายสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม (film forming solution)

สูตรที่	รหัสปริมาณส่วนผสม	
	คาราจีแนน	กลีเซอรอล
1	-1	-1
2	-1	+1
3	+1	-1
4	+1	+1
5	0	-1414
6	0	+1.414
7	-1.414	0
8	+1.414	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0

2) การเตรียมเป็นสารละลายและขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Casting

เตรียมโดยนำแป้งข้าว สตาร์ช หรือสตาร์ชดัดแปรตามข้อ 1) มาผสมกับน้ำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณรวม 250 กรัม แล้วนำบีกเกอร์บรรจุส่วนผสมไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โดยมีการคนตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา จากนั้นนำไปกำจัดฟองอากาศที่แทรกอยู่โดยใช้เครื่องเขย่าคลื่นความถี่สูง (sonicator) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 นาที ใช้ Syringe ดูดตัวอย่างมาครั้งละ 15 มิลลิลิตร โดยระวังไม่ให้มีฟองอากาศแทรก เทลงบนจานเพาะเชื้อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียสจนมีน้ำหนักคงที่ แล้วนำตัวอย่างฟิล์มที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

- ปริมาณความชื้น ตามวิธีมาตรฐาน 44-16 (AACC,1995) นำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่
- ความหนาของวัสดุบรรจุ ทดสอบโดยดัดแปลงตามวิธีของ ASTM D6988-08 โดยสุ่มวัดความหนาของตัวอย่าง 5 จุด ด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness Tester model 79-72 TMI)

○ ค่าสี ค่าการส่องผ่านของแสง และความโปร่งใสของฟิล์ม (Color, Light transmission and film transparency) วัดค่าสีของฟิล์มแป้งในรูปของค่า L* (lightness), a* (redness) และ b* (yellowness) ในระบบ CIE โดยใช้เครื่องวัดสี วัดค่าการส่องผ่านของแสง (Transmittance) โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 200 ถึง 800 นาโนเมตร และคำนวณค่าความโปร่งใส (Transparency) ของแผ่นฟิล์มตัวอย่างโดยใช้ค่าการส่องผ่านของแสง ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตามวิธีของ Chinabhark et al. (2007) ด้วยสมการ

$$\text{Transparency} = -\log T600/x$$

เมื่อ T600 คือค่าการส่งผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

x คือความหนาของแผ่นฟิล์มที่ใช้ทดสอบ (mm)

○ อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) โดยนำตัวอย่างฟิล์มมา pre-condition ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างมีปริมาณน้ำอิสระประมาณ 0.55% ก่อนนำมาทดสอบตามวิธี ASTM D 1434 – 82 (ASTM, 2009) โดยสุ่มตัดวัสดุบรรจุในแต่ละสภาวะทดสอบเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ตัวอย่างจะต้องปราศจากรอยพับ ขีดข่วน หรือรอยรั่ว ทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซ โดยใช้ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านก๊าซ (Illinoid model 8500) โดยทดสอบจำนวน 5 ซ้ำในแต่ละสภาวะทดสอบ

○ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) โดยทดสอบตามวิธี ASTM E 96-93 (ASTM, 2009) โดยสุ่มตัดวัสดุบรรจุในแต่ละสภาวะทดสอบเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร โดย ตัวอย่างจะต้องปราศจากรอยพับ ขีดข่วน หรือรอยรั่ว ทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำโดยใช้ถ้วยอลูมิเนียม ทดสอบหาค่าการซึมผ่านของไอน้ำ โดยทดสอบจำนวน 5 ซ้ำในแต่ละสภาวะทดสอบ

○ ค่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวของวัสดุบรรจุ โดยทดสอบตามวิธีASTM D 882-91 (ASTM, 2009) โดยสุ่มตัดฟิล์มตัวอย่างขนาด 25 ± 0.01 มิลลิเมตร และยาว 150 ± 0.01 มิลลิเมตร ที่มีขอบที่เรียบและขนานกัน ทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวของวัสดุด้วยเครื่อง Texture analyzer จำนวน 5 ซ้ำในแต่ละสภาวะทดสอบ

○ ลักษณะพื้นผิวและเนื้อฟิล์มโดย เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

12.3) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและสรุปผลการทดลอง

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์เชิงสถิติ SPSS (version 11) และ หารูปแบบสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคาราจีแนน และกลีเซอรอล และคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มโดย Regression analysis และทำการ Optimization โดย Response surface methodology ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์เชิงสถิติ minitab เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดของสตาร์ช คาราจีแนน และกลีเซอรอล ซึ่งทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากที่สุด

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงดังนี้

4.1 คุณภาพด้าน เคมี กายภาพ คุณสมบัติเชิงหน้าที่และการก่อฟิล์มของวัตถุดิบ

ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และปริมาณอะไมโลสแสดงดังตาราง 4-1 แป้งข้าวมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าสูงกว่าสตาร์ชข้าว และสตาร์ชข้าวดัดแปร($p \leq 0.05$) แต่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งปริมาณอะไมโลสนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญในการก่อเจลและทำให้เกิดโครงสร้างฟิล์ม โดยทั่วไปแป้งข้าวเจ้าจะมีปริมาณอะไมโลสผันแปรอยู่ระหว่าง 2-33 % (Juliano, 1984) ที่เหลือคืออะไมโลเพคติน อะไมโลสจะให้เจลที่คงตัวและแข็งแรงกว่าอะไมโลเพคติน เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวจึงสามารถจัดเรียงตัวโดยก่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลได้ดีกว่าอะไมโลเพคตินที่มีสายแขนงซึ่งขัดขวางการก่อเจล (Graf et al., 2003) อย่างไรก็ตามวัตถุดิบแป้งหรือสตาร์ชที่เหมาะต่อการนำมาทำเป็นฟิล์มควรมีอะไมโลสสูงกว่า 25 % (Bertuzzi et al., 2007; Bae et al 2008) กล่าวได้ว่าสตาร์ชข้าวทั้งสองชนิดมีความเหมาะสมในการเตรียมเป็นฟิล์มมากกว่าแป้งข้าวเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูงกว่า

ตาราง 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว สตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	วัตถุดิบ		
	แป้งข้าว	สตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าวดัดแปร
ความชื้น	$11.30^{b} \pm 0.11$	$8.97^{a} \pm 0.21$	$7.34^{a} \pm 0.56$
อะไมโลส	$31.04^{a} \pm 0.01$	$33.75^{b} \pm 0.35$	$33.21^{b} \pm 0.02$
โปรตีน	$7.20^{b} \pm 0.06$	$0.44^{a} \pm 0.02$	$0.38^{a} \pm 0.06$
ไขมัน	$0.41^{b} \pm 0.03$	$0.07^{a} \pm 0.01$	$0.06^{a} \pm 0.08$
เถ้า	$0.38^{b} \pm 0.01$	$0.03^{a} \pm 0.01$	$0.04^{a} \pm 0.02$

ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ $p=0.05$

ผลวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพของวัตถุดิบแป้งและสตาร์ชข้าว ได้แก่ ค่าสี ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาค ความเป็นผลึก แสดงดังตาราง 4.2 และภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

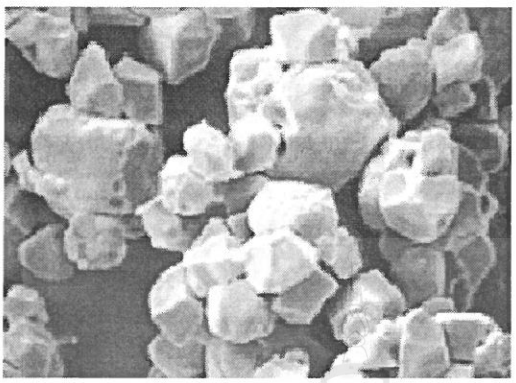
ตาราง 4-2 ค่าสีของแป้งข้าว สตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร

ค่าสี	วัตถุดิบ		
	แป้งข้าว	สตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าวดัดแปร
ความสว่าง (Lightness, L*)	$87.15^{a}\pm0.08$	$91.06^{b}\pm0.14$	$90.54^{b}\pm0.09$
ค่าสีเขียว (Greenness, a*)	$-1.33^{c}\pm0.11$	$-1.17^{b}\pm0.03$	$-0.85^{a}\pm0.01$
ค่าสีเหลือง (Yellowness, b*)	$2.14^{c}\pm0.21$	$1.11^{a}\pm0.06$	$1.57^{b}\pm0.04$

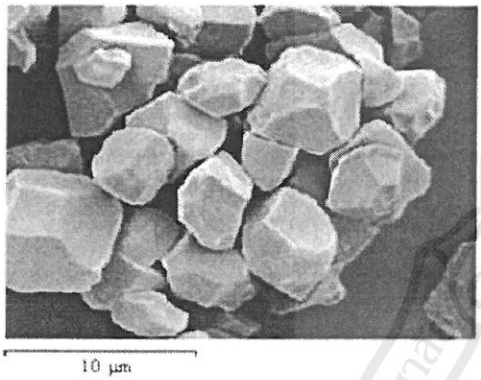
ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ p=0.05

แป้งข้าว สตาร์ชข้าว และสตาร์ชข้าวดัดแปรมีค่าสีแตกต่างกันเล็กน้อย แป้งข้าวจะมีค่าความสว่าง (L*) ต่ำกว่าสตาร์ชทั้งสองชนิด อีกทั้งมีค่าสีเหลือง (b*) สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณรงควัตถุที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวก่อนนำมาบดเป็นแป้ง สำหรับสตาร์ชนั้นได้มาจากการสกัดแป้งข้าวด้วยสารละลายด่าง ซึ่งกระบวนการสกัดให้บริสุทธิ์และล้างด้วยน้ำได้ช่วยลดปริมาณรงควัตถุดังกล่าว สตาร์ชจึงมีความสว่างมากกว่าแป้งข้าว นอกจากนี้พบว่าสตาร์ชข้าวดัดแปรมีค่าสีเหลือง (b*) มากกว่าสตาร์ชข้าว ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความร้อนร่วมกับความชื้นในระหว่างกระบวนการดัดแปร

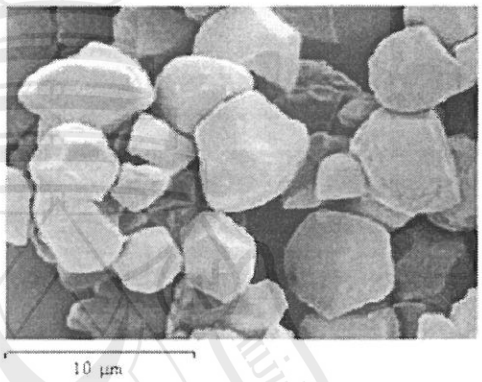
เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) ทำให้ทราบลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคเม็ดแป้งดังแสดงในภาพ 4-1 พบว่าแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวมีอนุภาคเป็นรูปหลายเหลี่ยม และขนาดอนุภาคประมาณ 4-8 ไมครอน สำหรับสตาร์ชข้าวดัดแปรยังคงรูปร่างของลักษณะคงเดิมเช่นเดียวกับสตาร์ชข้าวที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งแสดงว่าวิธีการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ที่ทำให้อนุภาคแป้งสูญเสียลักษณะตามธรรมชาติไป แต่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุลสตาร์ช (fine structure) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ ดังจะได้กล่าวถึงต่อไป



a. แป้งข้าว

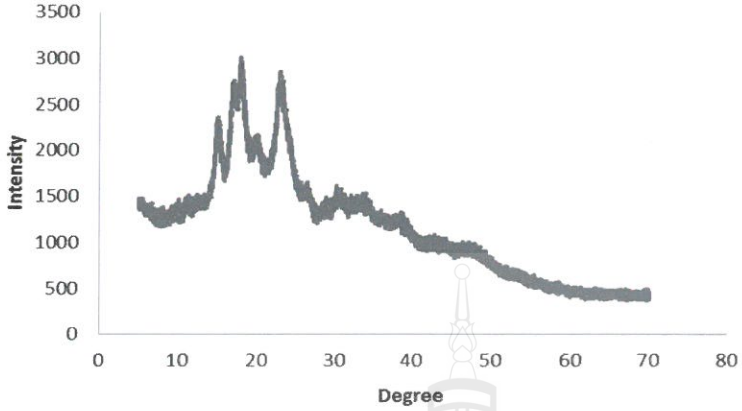


b. สตาร์ชข้าว

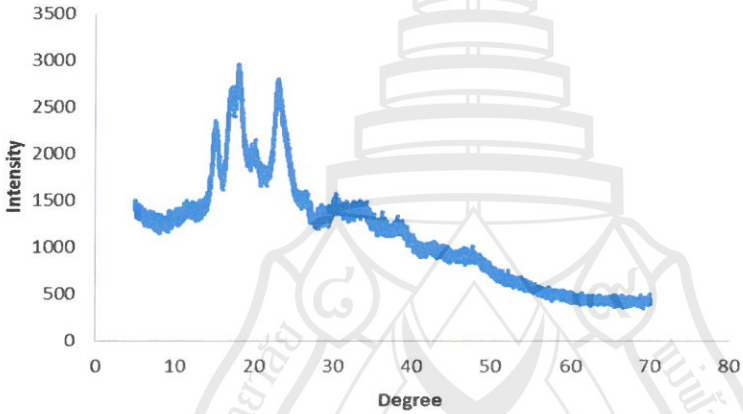


c. สตาร์ชข้าวดัดแปร

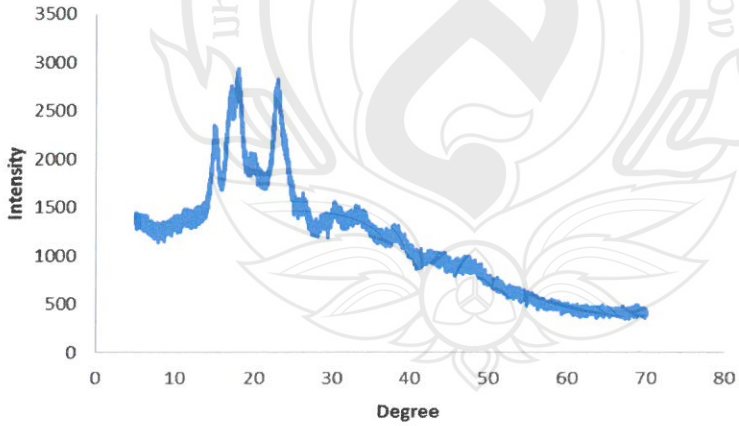
ภาพ 4-1 ลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคของ (a) แป้งข้าว (b) สตาร์ชข้าวและ (c) สตาร์ชข้าวดัดแปร โดย SEM



a. แป้งข้าว



b. สตาร์ชข้าว



c. สตาร์ชข้าวดัดแปร

ภาพ 4-2 ลักษณะความเป็นผลึกของ (a) แป้งข้าว (b) สตาร์ชข้าว และ (c) สตาร์ชข้าวดัดแปร โดย XRD

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะความเป็นผลึกของแป้งข้าวและสตาร์ชข้าวโดยใช้เทคนิครังสี X-RAY รูปแบบของการหักเหรังสี X-RAY แสดงให้เห็นลักษณะความเป็นผลึกของแป้งข้าว สตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร (ภาพ 4-2) ทุกตัวอย่างแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ซึ่งให้พีคเดี่ยวที่ 15 และ 23 $^{o}2\theta$ และพีคคู่ที่ 17 และ 17.9 $^{o}2\theta$ แต่ไม่มีพีคที่ 5.6 $^{o}2\theta$ อันเป็นลักษณะธรรมชาติของแป้งจากธัญพืชซึ่งแตกต่างจากพืชหัวและพืชตระกูลถั่ว นอกจากนี้ยังพบว่าการดัดแปรด้วยความร้อนและความชื้นไม่ส่งผลต่อลักษณะผลึกของสตาร์ชข้าวแต่อย่างใด ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานที่มีมาก่อนหน้านี้โดย Gunaratne & Hoover (2002) และ Sun et al (2014) ซึ่งรายงานว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนและความชื้น ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของสตาร์ชแต่อย่างใด

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของวัตถุดิบทั้งสามชนิด ได้แก่ ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความใสของเจล และความหนืด แสดงดังตาราง 4-3 พบว่าแป้งข้าวมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้เจลที่มีความขุ่นมากกว่า คือมีค่า %Transmittance ต่ำกว่าเจลจากสตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปรพบว่ามีความสามารถในการอุ้มน้ำไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชข้าวดัดแปรมีความใสมากกว่าสตาร์ชข้าว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดในระหว่างการเพิ่มและลดอุณหภูมิโดยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชข้าวมีค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความหนืด (pasting temperature) ต่ำกว่าแป้งข้าว และกระบวนการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นทำให้มีค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรมีความคงทนต่อการให้ความร้อนมากขึ้น โดยจะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เกิดความหนืด และความหนืดจะค่อยๆ เพิ่มจนสูงสุด โดยใช้เวลา (peak time) นานกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Hormdok & Noomhotm (2007)

โดยรวมสตาร์ชมีค่าความหนืด Peak viscosity Trough Breakdown Final viscosity และ Setback ต่ำกว่าแป้งข้าว ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่แป้งข้าวมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่โปรตีน และไขมัน ซึ่งส่งผลทำให้แป้งข้าวมีความหนืดสูงกว่าสตาร์ชข้าว สตาร์ชข้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีค่าความหนืดโดยรวมลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นโดยไม่ทำให้เกิดเจลาติไนซ์ ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวมีระเบียบมากขึ้น ทนต่อความร้อนมากขึ้น แต่ทำให้การพองตัวลดลงและความหนืดลดลง (Hormdok & Noomhotm, 2007)

ตาราง 4-3 ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความใสและความหนืดของเจลแป้งข้าว สตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร

คุณสมบัติเชิงหน้าที่	วัตถุดิบ		
	แป้งข้าว	สตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าวดัดแปร
ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water binding capacity, %)	$14.02^{a}\pm0.75$	$9.39^{b}\pm1.20$	$10.46^{b}\pm0.04$
ความใสของเจล (% Transmittance)	$0.40^{a}\pm0.20$	$0.60^{b}\pm0.01$	$0.80^{c}\pm0.01$
ความหนืดของเจล			
○ Pasting temperature (°C)	$80.88^{b}\pm0.45$	$78.73^{a}\pm0.53$	$85.60^{c}\pm1.06$
○ Peak time (min)	$6.24^{a}\pm0.17$	$6.37^{a}\pm0.14$	$7.00^{b}\pm0.01$
○ Peak viscosity (RVU)	$277.3^{c}\pm5.80$	$204.75^{b}\pm2.01$	$163.50^{a}\pm1.18$
○ Trough (RVU)	$239.60^{c}\pm10.60$	$170.38^{b}\pm8.31$	$142.46^{a}\pm0.41$
○ Breakdown (RVU)	$37.70^{b}\pm6.70$	$34.37^{b}\pm6.30$	$21.04^{a}\pm0.77$
○ Final viscosity (RVU)	$452.70^{c}\pm8.50$	$271.54^{b}\pm5.01$	$215.63^{a}\pm6.07$
○ Setback (RVU)	$213.10^{c}\pm18.60$	$101.17^{b}\pm13.31$	$73.17^{a}\pm5.66$

ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ p=0.05

ตาราง 4-4 เนื้อสัมผัสของเจลแป้งข้าว สตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร

เนื้อสัมผัสของเจล	วัตถุดิบ		
	แป้งข้าว	สตาร์ชข้าว	สตาร์ชข้าวดัดแปร
○ Hardness	$152.88^{a}\pm9.25$	$257.96^{b}\pm46.95$	$429.22^{c}\pm54.35$
○ Adhesiveness	$53.85^{a}\pm12.62$	$44.87^{a}\pm11.43$	$50.24^{a}\pm13.71$
○ Springiness	$0.93^{a}\pm0.02$	$0.94^{a}\pm0.01$	$0.92^{a}\pm0.02$
○ Cohesiveness	$0.83^{a}\pm0.24$	$0.91^{a}\pm0.03$	$0.95^{a}\pm0.02$

ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ p=0.05

ตาราง 4-4 แสดงค่าเนื้อสัมผัสเจลที่วัดโดย Texture analyzer โดยแป้งข้าวให้เจลที่มีความแข็งแรง (gel hardness) ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในขณะที่สตาร์ชข้าวดัดแปรให้เจลที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hormdok & Noomhotm (2007) ที่รายงานว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างเจลสตาร์ช อย่างไรก็เจลที่เตรียมจากวัตถุดิบทั้ง

สามชนิดมีค่า adhesiveness, cohesiveness และ springiness ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ทั้งนี้วัตถุดิบที่เหมาะต่อการนำมาทำเป็นฟิล์มควรจะมีความแข็งแรงของเจลสูงและสามารถยึดเกาะกันได้ดี (Graf et al., 2003) ดังนั้นสตาร์ชข้าวดัดแปรจึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการเตรียมเป็นฟิล์ม

ตาราง 4-5 อุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ ของแป้งข้าว สตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร

คุณสมบัติเชิงหน้าที่	**วัตถุดิบ**		
	แป้งข้าว	**สตาร์ชข้าว**	**สตาร์ชข้าวดัดแปร**
อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ (°C)			
○ อุณหภูมิ onset	$72.55^{b}\pm0.77$	$67.67^{c}\pm0.36$	$74.14^{a}\pm0.45$
○ อุณหภูมิ peak	$76.05^{a}\pm0.21$	$73.49^{b}\pm0.08$	$77.97^{a}\pm0.23$
○ อุณหภูมิ conclusion	$80.42^{b}\pm0.84$	$75.67^{c}\pm0.54$	$82.14^{a}\pm0.71$
พลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ (Enthalpy, J/g)	$1.32^{a}\pm0.14$	$1.32^{a}\pm0.38$	$1.26^{b}\pm0.98$

ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ $p=0.05$

เมื่อทำการวิเคราะห์อุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ โดย Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าสตาร์ชข้าวมีค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ onset peak และ conclusion ต่ำกว่าแป้งข้าวอย่างมีนัยสำคัญ การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนและความชื้นส่งผลทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) กล่าวได้ว่าสตาร์ชดัดแปรมีความทนต่อความร้อนได้มากขึ้น ผลจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานที่มีมาก่อนหน้านี้ของ Gunaratne &Hoover (2002) และ Puncha-arnon & Uttapap (2013) ซึ่งได้อธิบายว่ากระบวนการดัดแปรด้วยความร้อนและความชื้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของสตาร์ช จึงเกิดการเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

ภายหลังการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น พบว่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชลดลง ($p<0.05$) จากงานวิจัยที่ผ่านมา การเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเจลาติไนซ์ขึ้นอยู่กับสภาวะของการดัดแปร โดยอาจทำให้ค่าพลังงานดังกล่าวคงเดิม เพิ่มขึ้น หรือลดลงได้ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานในการเจลาติไนซ์ เกิดจากการที่โมเลกุลสตาร์ชทนต่อความร้อนมากขึ้น จึงต้องการพลังงานในการเจลาติไนซ์สูงขึ้น ในทางตรงข้ามการลดลงของค่าพลังงานค่าพลังงานในการเจลาติไนซ์ มักเกี่ยวข้องกับการที่อนุภาคแป้งเกิด

การเจลาติไนซ์ไปบางส่วน (partial gelatinization) อนุภาคที่เหลือจึงใช้พลังงานในการเจลาติไนซ์น้อยลง ในงานวิจัยนี้ สตาร์ชดัดแปรอาจเกิดเจลาติไนซ์บางส่วนจึงทำให้การพลังงานในการเจลาติไนซ์ลดลง

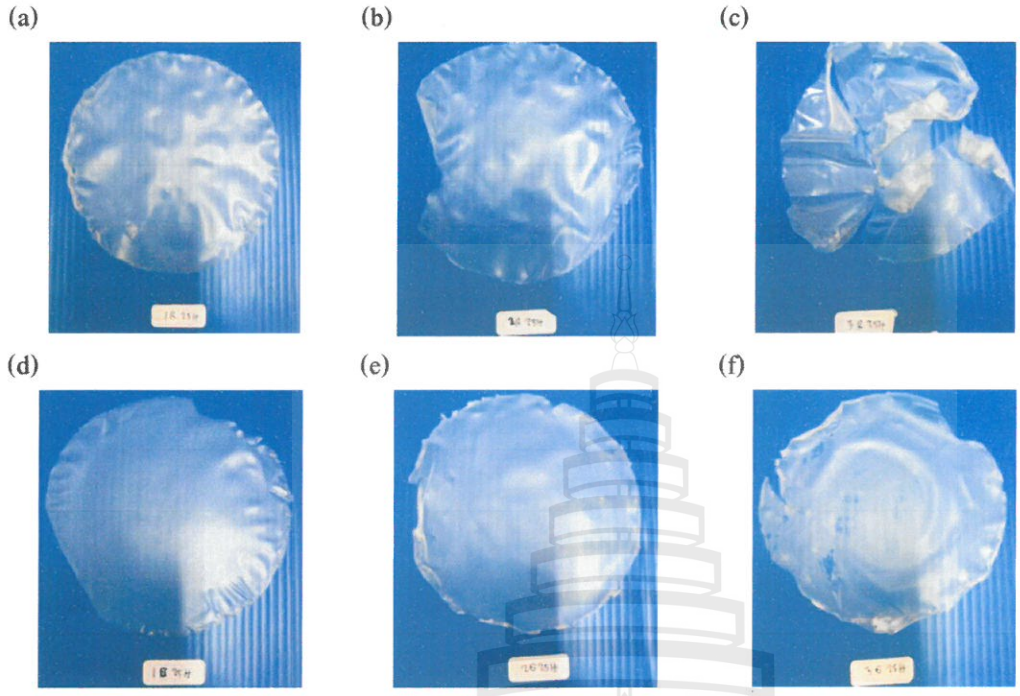
สรุป จากการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของวัตถุดิบจากข้าวสามชนิดได้แก่ แป้งข้าว สตาร์ชข้าว และสตาร์ชข้าวดัดแปร พบว่าสตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปรมีความเหมาะสมมากกว่าแป้งข้าวในการนำมาเตรียมเป็นฟิล์ม เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง ให้เนื้อเจลใสและมีความแข็งแรงสูง ในการทดลองลำดับถัดไปจึงทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อนำสตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปรมาเตรียมเป็นฟิล์ม หาระดับความเข้มข้นของสตาร์ชที่เหมาะสม และเปรียบเทียบคุณสมบัติฟิล์มที่เตรียมได้

4.2 การพัฒนาสูตรการเตรียมฟิล์มจากสตาร์ชข้าวร่วมกับสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม และสารกลุ่มพลาสติไซเซอร์

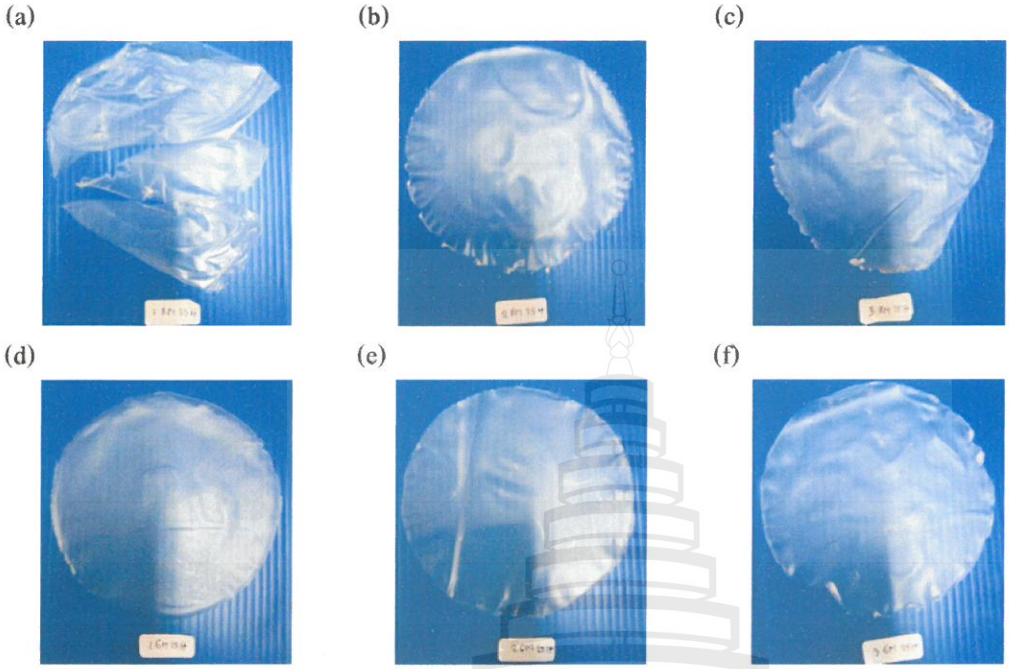
4.2.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อเตรียมฟิล์มจากสตาร์ชข้าวหรือและสตาร์ชข้าวดัดแปร

ในการทดลองเบื้องต้น (preliminary test) เพื่อหาความเข้มข้นของสตาร์ชซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในสูตรฟิล์ม ซึ่งทำโดยเตรียมสารละลายสตาร์ชให้มีความเข้มข้น 1%, 2.5% และ 5% w/w โดยมีกลีเซอรอล 20% ของน้ำหนักสตาร์ช แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์ม พบว่าสารละลายสตาร์ชความเข้มข้น 2.5% w/w มีความเหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากให้ความข้นหนืดพอเหมาะ แผ่กระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ให้ฟิล์มที่มีมีความคงตัวดี สามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้โดยไม่ฉีกขาด ดังนั้นจึงกำหนดให้ใช้สารละลายสตาร์ชที่ความเข้มข้น 2.5% w/w เป็นมาตรฐาน

ในการหาว่าสตาร์ชชนิดใดที่มีความเหมาะสมมากกว่ากันในการเตรียมเป็นฟิล์มระหว่างสตาร์ชข้าวและสตาร์ชดัดแปร ได้เตรียมสารละลายสตาร์ชแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้น 25% w/w โดยมีกลีเซอรอล 10% 30% และ50% ของน้ำหนักสตาร์ช และคาราจีแนน 0%, 0.5%, 1.0% และ 1.5% ของน้ำหนักสตาร์ช จากนั้นเปรียบเทียบลักษณะปรากฏของฟิล์มที่ได้จากสตาร์ชข้าว (ภาพ 4-3) และสตาร์ชข้าวดัดแปร (ภาพ 4-4)



ภาพ 4-3 ลักษณะฟิล์มที่ได้จากฟิล์มสูตรต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย สตาร์ชข้าว (% w/w) กลีเซอรอล (% ของน้ำหนักสตาร์ช) และคาราจีแนน (% ของน้ำหนักสตาร์ช) (a) 2.5%, 10%, 0%; (b) 2.5%, 30%, 0%; (c) 2.5%, 50%, 0%; (d) 2.5%, 10%, 0.5%; (e) 2.5%, 30%, 1.0%; (f) 2.5%, 50%, 1.5%



ภาพ 4-4 ลักษณะฟิล์มที่ได้จากสตาร์ชข้าวดัดแปร (% w/w) กลีเซอรอล (% ของน้ำหนักสตาร์ช) และคาราจีแนน (% ของน้ำหนักสตาร์ช) (a) 2.5%, 10%, 0%; (b) 2.5%, 30%, 0%; (c) 2.5%, 50%, 0%; (d) 2.5%, 10%, 0.5%; (e) 2.5%, 30%, 1.0%; (f) 2.5%, 50%, 1.5%

พบว่าในภาพรวมสตาร์ชข้าวดัดแปรให้ฟิล์มที่มีลักษณะปรากฏดีและเนื้อสัมผัสฟิล์มคงตัว อีกทั้งยังลอกออกจากแม่พิมพ์ได้ดีกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชข้าว ดังนั้นจึงเลือกสตาร์ชดัดแปรมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักในการเตรียมฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าการผันแปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลและคาราจีแนนในส่วนผสมส่งผลต่อลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ โดยในสตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปรซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานต่างกัน การเติมกลีเซอรอลและคาราจีแนนปริมาณเท่ากันในสูตรส่งผลต่อคุณภาพฟิล์มได้ไม่เท่ากัน

สำหรับสตาร์ชข้าว การเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 10% และ 30% ของน้ำหนักสตาร์ชในสูตรช่วยให้ฟิล์มมีความคงตัวและยืดหยุ่นสามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลเป็น 50% ของน้ำหนักสตาร์ชทำให้ฟิล์มชื้นและผิวฟิล์มมีความเหนียวจึงลอกออกจากฟิล์มยากและมีโอกาสฉีกขาดได้ สำหรับสตาร์ชข้าวดัดแปร ปริมาณกลีเซอรอล 10% ของน้ำหนักสตาร์ชไม่เพียงพอต่อการสร้างความคงตัวและยืดหยุ่นให้ฟิล์ม แต่ปริมาณกลีเซอรอล 30% และ 50% ของน้ำหนักสตาร์ชทำให้ได้ฟิล์มที่คงตัวและ

ยืดหยุ่นดี อย่างไรก็ตามการเติมคาราจีแนนในสูตรสำหรับสตาร์ชทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยเสริมให้ฟิล์มมีความคงตัวดีขึ้นและในทุกระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอลคือ 10%, 30% และ 50 % ของน้ำหนักสตาร์ช ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติไซเซอร์ร่วมกับคาราจีแนนเป็นสารเสริมคุณภาพในการเตรียมฟิล์มจากสตาร์ชทั้งสองชนิด

นอกจากนี้ยังพบว่าการผันแปรอัตราส่วนของกลีเซอรอลและคาราจีแนนในส่วนผสมส่งผลต่อคุณสมบัติฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ในด้านความชื้นและความหนาของฟิล์ม ดังตาราง 4.6

ตาราง 4-6 ปริมาณความชื้นและความหนาของฟิล์มที่ได้จากฟิล์มสูตรต่างๆ

สูตร	ปริมาณส่วนผสม			ปริมาณความชื้น	ความหนา
	สตาร์ช (% w/w)	กลีเซอรอล (% starch)	คาราจีแนน (% starch)	(%)	(มิลลิเมตร)
ฟิล์มจากสตาร์ชข้าว					
a	2.5	10	0	$12.40^{b}\pm0.11$	$0.040^{a}\pm0.01$
b	2.5	30	0	$17.37^{c}\pm0.05$	$0.045^{a}\pm0.01$
c	2.5	50	0	$23.87^{f}\pm0.12$	$0.070^{c}\pm0.02$
d	2.5	10	0.5	$11.56^{a}\pm0.06$	$0.043^{a}\pm0.01$
e	2.5	30	1	$19.74^{d}\pm0.02$	$0.067^{b}\pm0.01$
f	2.5	50	1.5	$23.46^{e}\pm0.03$	$0.067^{b}\pm0.01$
ฟิล์มจากสตาร์ชข้าวดัดแปร					
a	2.5	10	0	$11.37^{a}\pm0.06$	$0.043^{a}\pm0.01$
b	2.5	30	0	$19.13^{c}\pm0.03$	$0.052^{b}\pm0.01$
c	2.5	50	0	$22.40^{d}\pm0.06$	$0.062^{c}\pm0.01$
d	2.5	10	0.5	$13.08^{b}\pm0.04$	$0.053^{b}\pm0.01$
e	2.5	30	1	$19.17^{c}\pm0.01$	$0.061^{c}\pm0.01$
f	2.5	50	1.5	$23.53^{c}\pm0.04$	$0.075^{d}\pm0.01$

ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามซ้ำ และค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ $p=0.05$

พบว่าการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในสูตรฟิล์มของสตาร์ชทั้งสองชนิด ทำให้ปริมาณความชื้นในฟิล์มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากความสามารถในการอุ้มน้ำของกลีเซอรอล และเนื่องจากความชื้นส่งผลต่อ

คุณสมบัติในการป้องกันของฟิล์ม อันได้แก่ความแข็งแรง อัตราการซึมผ่านของอากาศและไอน้ำผ่านฟิล์ม เป็นต้น การเติมกลีเซอรอลจึงต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ในงานวิจัยโดย Burtuzzi (2007) รายงานว่าการเติมกลีเซอรอลมากกว่า 30% ของน้ำหนักแป้งทำให้โครงสร้างฟิล์มหลวม ได้ฟิล์มที่ชื้นและขุ่น สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในฟิล์มยังส่งผลต่อความหนาของฟิล์มอีกด้วย โดยพบว่าในฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล 50% ของน้ำหนักสตาร์ชมีความชื้นสูงเกินไปทำให้ฟิล์มมีความหนามาก ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงกำหนดให้ใช้กลีเซอรอลไม่เกิน 30% ของน้ำหนักสตาร์ชในสูตร ส่วนการเติมคาราจีแนนปริมาณ 0.5-1.5% ของน้ำหนักสตาร์ชไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อค่าความชื้นและความหนาของฟิล์ม แต่มีส่วนช่วยเพิ่มความคงตัวของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมของกลีเซอรอลและคาราจีแนนในสารละลายสำหรับขึ้นรูปฟิล์มต่อไป ซึ่งจากการทดลองในเบื้องต้นนี้ทำให้สามารถช่วงค่าที่เหมาะสมในการศึกษาปริมาณของกลีเซอรอลคือ 10-30% ของน้ำหนักสตาร์ช และคาราจีแนน 0.5-1.5% ของน้ำหนักสตาร์ช

4.2.2 การทดลองหาปริมาณที่เหมาะสมของสารพลาสติไซเซอร์(กลีเซอรอล) และสารไฮโดรคอลลอยด์ (คาราจีแนน)

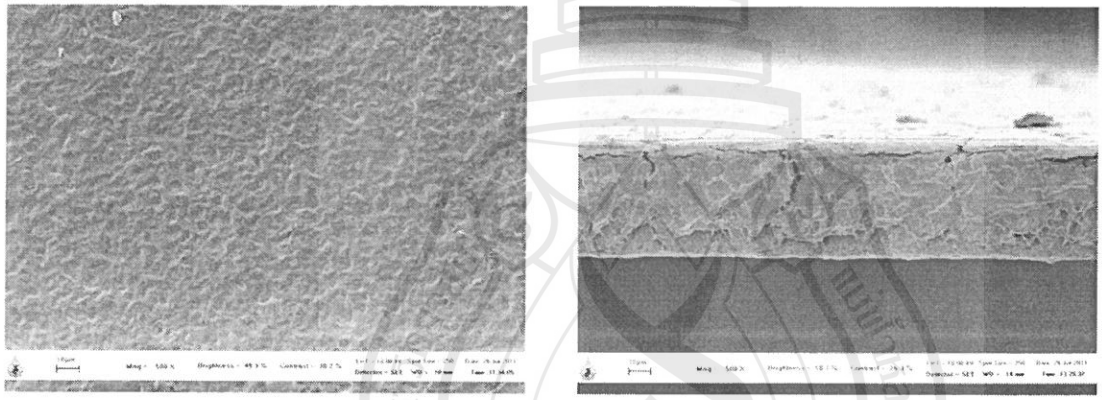
จากการวางแผนการทดลองแบบ Central composite design มีสองปัจจัยทดลองคือ ปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอล ทำการผันแปรปัจจัยทดลองเป็น 5 ระดับคือ สูง (+1) กลาง (0) ต่ำ (-1) +α (+1.414) และ -α (-1.414) ทำให้ได้สูตรฟิล์มที่ประกอบด้วยปริมาณกลีเซอรอลและคาราจีแนนแตกต่างกัน และมีการทำทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 3 ซ้ำ รวมทั้งหมดเป็น 11 สูตร ดังแสดงในตาราง 4-7

ตาราง 4-7 ปริมาณส่วนผสมสตาร์ชข้าวดัดแปร กัม และพลาสติไซเซอร์ในการเตรียมสารละลายสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม (film forming solution)

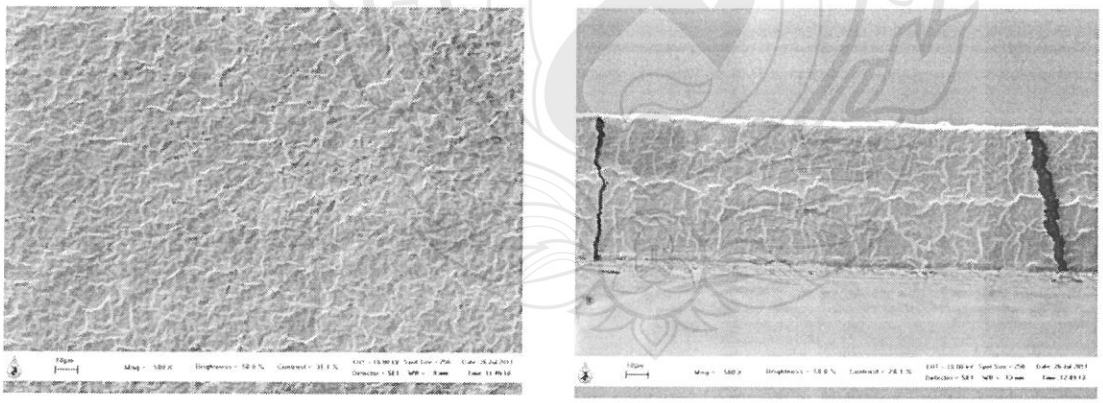
สูตรที่	รหัสปริมาณส่วนผสม		ปริมาณส่วนผสมที่ใช้จริง (ร้อยละของสตาร์ชข้าวดัดแปร)	
	คาราจีแนน	กลีเซอรอล	คาราจีแนน	กลีเซอรอล
1	-1	-1	1	10
2	-1	+1	1	30
3	+1	-1	2	10
4	+1	+1	2	30
5	0	-1414	1.5	5.86
6	0	+1.414	1.5	34.14
7	-1.414	0	0.8	20
8	+1.414	0	2.2	20
9	0	0	1.5	20
10	0	0	1.5	20
11	0	0	1.5	20

4.2.2.1 ลักษณะพื้นผิวและเนื้อฟิล์มโดย Scanning electron microscopy (SEM)

เมื่อนำส่วนผสมในแต่ละสูตรมาเตรียมและขึ้นรูปเป็นฟิล์มและทำให้แห้งแล้ว ได้นำแผ่นฟิล์มมาตรวจดูลักษณะพื้นผิวและเนื้อฟิล์มโดย Scanning electron microscopy (SEM) ดังแสดงในภาพ 4-5 โดยพบว่าการผันแปรปริมาณกลีเซอรอลและคาราจีแนนในสูตรการเตรียมสารละลายฟิล์ม ไม่ทำให้ฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มทั้ง 11 สูตร มีพื้นผิวเรียบและฟิล์มมีโครงสร้างค่อนข้างแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดี ทั้งนี้แม้จะสังเกตเห็นรอยแยกเล็กๆ จากรูปถ่ายหน้าตัดของแผ่นฟิล์มแต่ไม่ได้เป็นผลทำให้ฟิล์มปริแตกเนื่องจากมีขนาดเล็กมากเพียง 1-2 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชและคาราจีแนนถือเป็นสารโพลีเมอร์กลุ่มคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกันจึงมีการรวมตัวกันได้ดี อีกทั้งปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ในสูตรแม้จะอยู่ที่ปริมาณต่ำสุดคือร้อยละ 5.86 ในสูตรที่ 5 ก็เพียงพอในการทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ทำให้ฟิล์มคงรูปได้

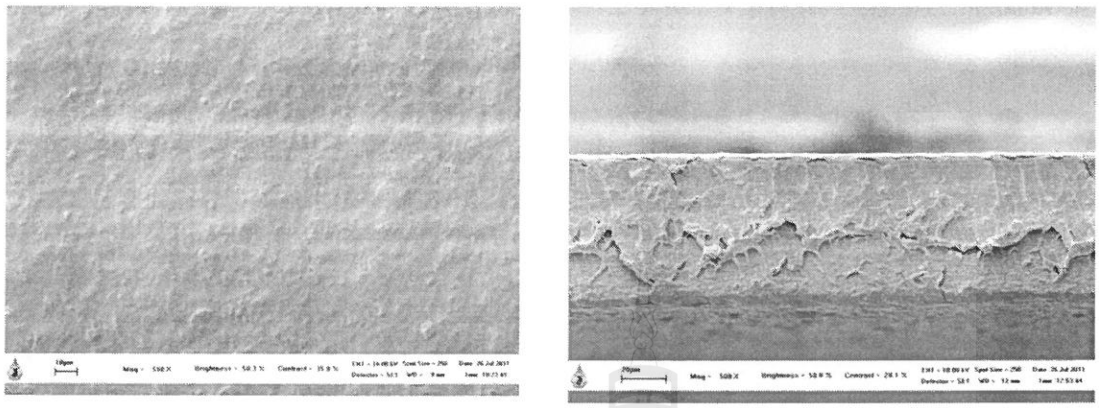


(1) คาราจีแนน 1% กลีเซอรอล 10%

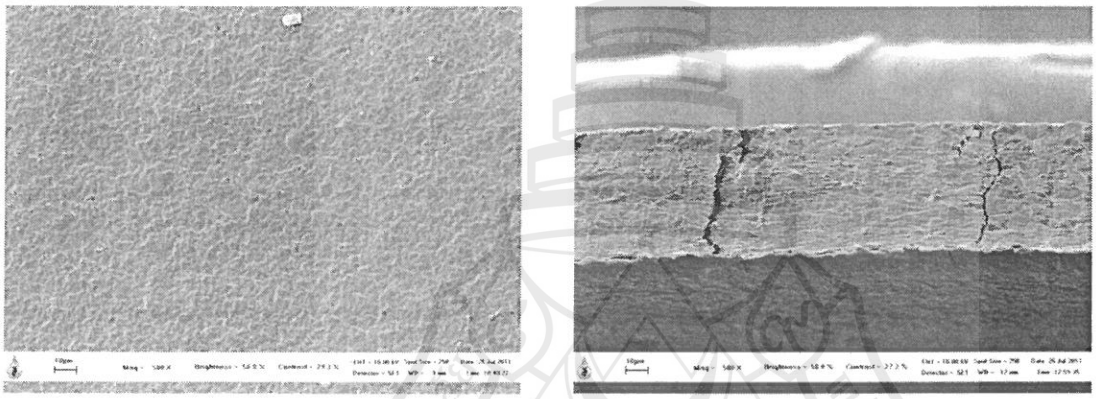


(2) คาราจีแนน 1% กลีเซอรอล 30%

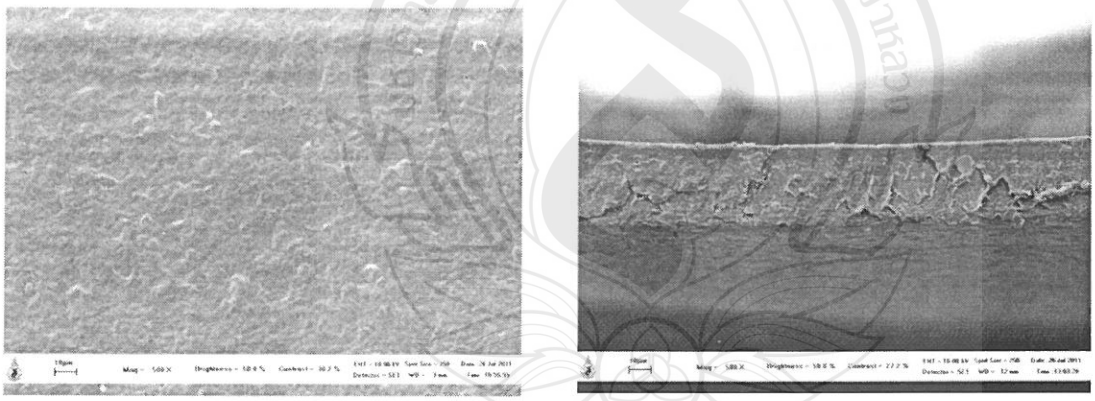
ภาพ 4-5 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า



(3) คาราจีแนน 2% กลีเซอรอล 10%

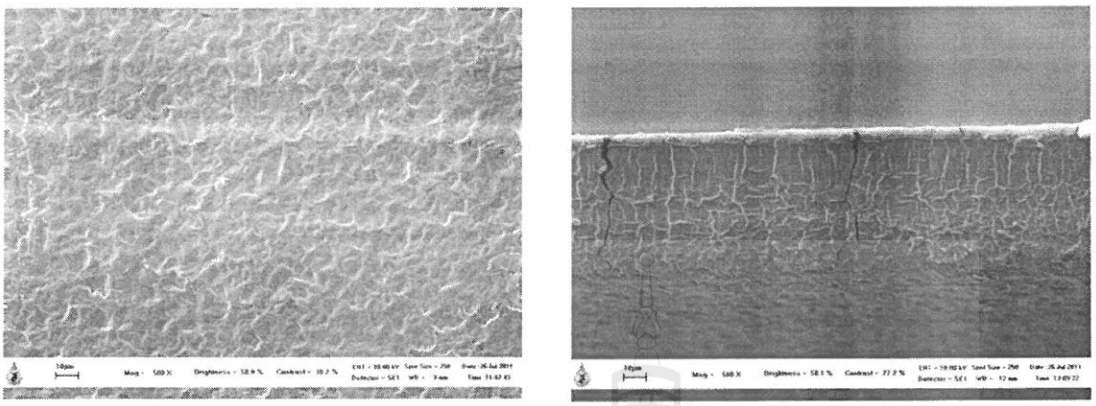


(4) คาราจีแนน 2% กลีเซอรอล 30%

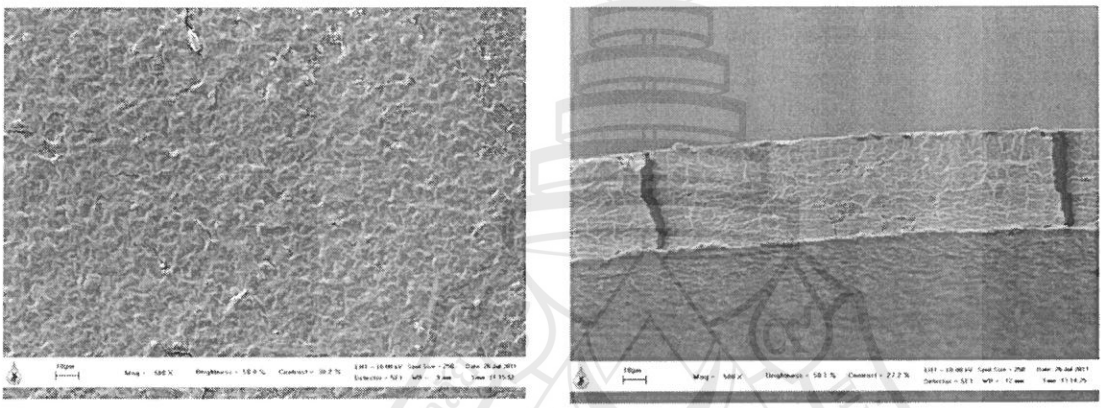


(5) คาราจีแนน 1.5% กลีเซอรอล 5.86%

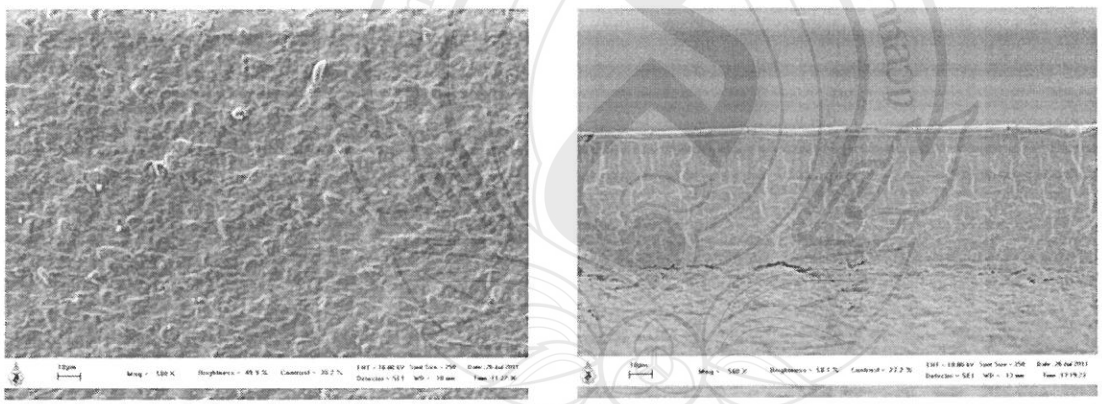
ภาพ 4-5 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)



(6) คาราจีแนน 1.5% กลีเซอรอล 34.14%

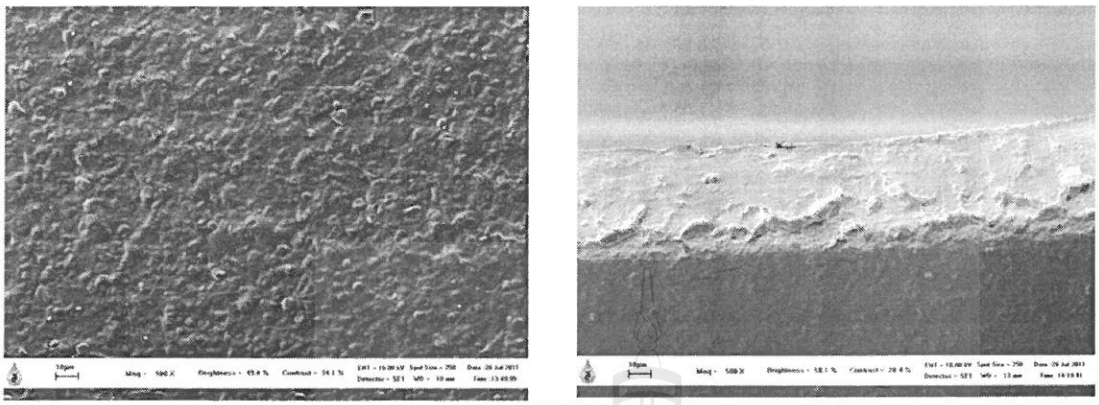


(7) คาราจีแนน 0.8% กลีเซอรอล 20%

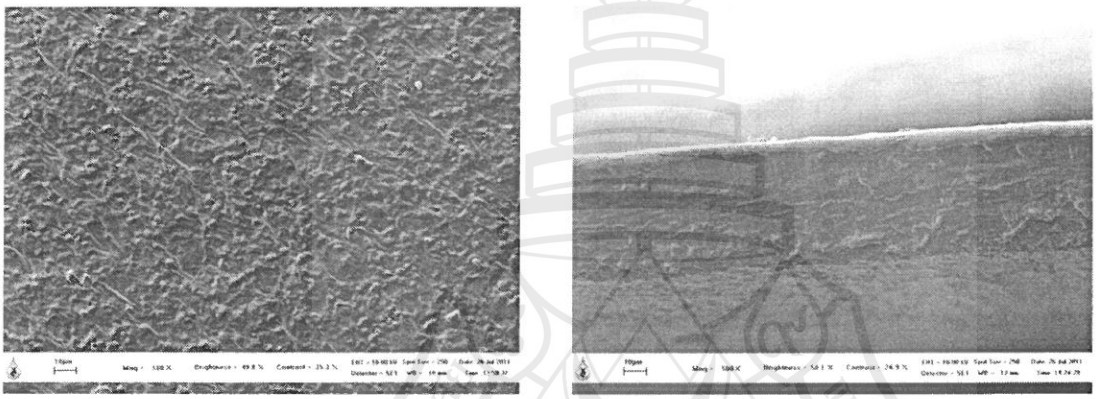


(8) คาราจีแนน 2.2% กลีเซอรอล 20%

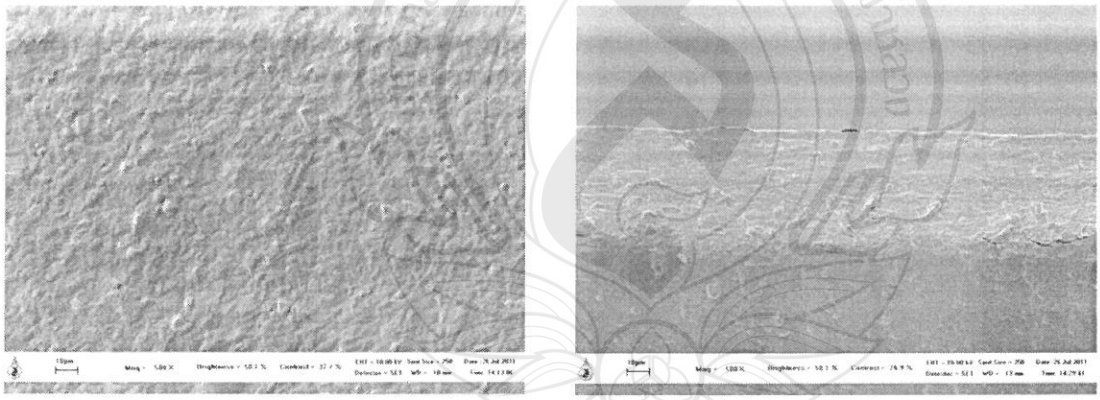
ภาพ 4-5 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)



(9) คาราจีแนน 1.5% กลีเซอรอล 20%



(10) คาราจีแนน 1.5% กลีเซอรอล 20%



(11) คาราจีแนน 1.5% กลีเซอรอล 20%

ภาพ 4-5 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)

4.2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

ตาราง 4-8 แสดงให้เห็นว่าการผันแปรปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายฟิล์มทำให้ฟิล์มมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพแตกต่างกัน โดยพบว่าในสูตรที่มีกลีเซอรอลปริมาณมาก เมื่อทำให้ฟิล์มแห้งลงจนมีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิห้องแล้วยังคงมีค่าความชื้นสูง ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารกลุ่มพอลีออล (polyol)ที่มีคุณสมบัติดูดน้ำได้สูง (Carmen et al., 2008) และส่งผลโดยตรงต่อความหนาของฟิล์ม ในด้านสีปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลที่ใช้ในสูตรส่งผลต่อค่าลี L* a* และ b* ของฟิล์มค่อนข้างน้อย แต่ส่งผลต่อค่า Total color difference (ΔE) อย่างมีนัยสำคัญ

ตาราง 4-8 ปริมาณความชื้น ความหนา และค่าสีของฟิล์มสูตรต่างๆ

สูตรที่	ปริมาณส่วนผสม (% starch)		ปริมาณความชื้น (% w/w)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ค่าสี			
	คาราจีแนน	กลีเซอรอล			L	a*	b*	ΔE
1	1	10	10.80±0.03	76.67±3.56	88.81±0.68	-1.00±0.02	2.71±0.21	4.43±0.68
2	1	30	21.45±0.24	66.07±7.26	87.88±0.27	-0.89±0.24	2.82±0.09	5.37±0.27
3	2	10	11.57±0.48	61.87±2.31	88.02±0.39	-0.98±0.01	2.59±0.08	5.21±0.39
4	2	30	14.49±0.19	71.60±9.82	91.10±0.04	-1.07±0.01	2.78±0.13	2.17±0.04
5	1.5	5.86	9.80a±0.06	76.20±3.78	87.73±0.18	-1.00±0.02	2.42±0.06	5.50±0.18
6	1.5	34.14	25.99±0.55	59.13±3.60	87.40±0.11	-0.98±0.05	2.56±0.05	5.83±0.11
7	0.8	20	21.60±0.98	63.80±4.91	88.62±0.41	-0.98±0.04	2.25±0.14	4.61±0.41
8	2.2	20	21.83±0.42	59.87±9.09	90.58±0.23	-1.05±0.02	2.83±0.11	2.69±0.23
9	1.5	20	22.06±0.77	66.20±9.91	88.56±0.18	-1.06±0.02	2.64±0.23	4.68±0.18
10	1.5	20	24.37±0.51	61.27±3.89	90.86±0.25	-1.08±0.02	2.23±0.06	2.38±0.25
11	1.5	20	25.79±0.75	65.20±2.72	90.19±0.24	-1.06±0.03	2.35±0.22	3.05±0.24

4.2.2.3 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของฟิล์ม

การผันแปรปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายฟิล์มทำให้ฟิล์มมีคุณสมบัติด้านความทึบแสงและความโปร่งแสงแตกต่างกันดังตารางที่ 4-9 โดยรวมปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลที่ใช้ในสูตรส่งผลค่าความทึบแสงของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลต่อค่าความโปร่งแสงของฟิล์มค่อนข้างน้อย

ตาราง 4-9 ความทึบแสงและความโปร่งแสงของฟิล์มสูตรต่างๆ

สูตรที่	ปริมาณส่วนผสม (% starch)		ค่าความทึบแสง (Opacity, AU x nm)	ความโปร่งใสของฟิล์ม (Transparency)
	คาราจีแนน	กลีเซอรอล		
1	1	10	129.53±9.75	5.09±0.03
2	1	30	147.49±8.76	5.31±0.05
3	2	10	134.08±5.33	5.13±0.03
4	2	30	104.76±12.50	5.12±0.04
5	1.5	5.86	116.05±18.99	5.12±0.06
6	1.5	34.14	142.15±7.10	5.29±0.04
7	0.8	20	108.70±24.16	5.07±0.07
8	2.2	20	146.01±36.39	5.10±0.10
9	1.5	20	166.95±23.84	5.08±0.11
10	1.5	20	119.25±19.07	5.08±0.06
11	1.5	20	119.77±11.61	4.95±0.04

นอกจากนี้ยังพบการผันแปรปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายฟิล์มส่งผลต่อคุณสมบัติในการป้องกันของฟิล์มได้แก่ ความต้านทางแรงดึงขาด (tensile strength) การยืดตัวของฟิล์ม (elongation) และอัตราการซึมผ่านของแก๊ซและไอน้ำผ่านฟิล์มดังแสดงในตาราง 4-10

ตาราง 4-10 ความต้านทานแรงดึง อัตราการยืดตัว และอัตราการซึมผ่านแก๊ซและไอน้ำผ่านฟิล์มสูตรต่างๆ

สูตรที่	ปริมาณส่วนผสม (% starch)		ความต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength, pa)	การยืดตัว (Elongation, mm)	อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (cm^3/m^2.day)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (g/m^2.day)
	คาราจีแนน	กลีเซอรอล				
1	1	10	3068.94±431.62	1.14±0.40	111.00±1.41	2095.76±12.50
2	1	30	549.59±56.94	6.42±2.11	106.00±2.83	1075.76±31.54
3	2	10	1251.97±265.12	0.31±0.09	173.50±7.78	2606.50±55.16
4	2	30	1588.33±387.70	0.43±0.14	179.00±5.66	4242.46±54.77
5	1.5	5.86	3704.40±709.77	0.84±0.21	59.00±7.07	3389.10±31.89
6	1.5	34.14	417.99±31.60	8.13±0.94	1277.50±31.82	2542.47±24.11
7	0.8	20	1180.10±142.69	9.30±2.64	70.00±1.41	5341.43±54.61
8	2.2	20	754.94±47.94	5.86±1.19	775.00±24.04	4213.41±53.42
9	1.5	20	1094.76±75.81	9.65±1.92	140.50±7.78	4935.32±77.98
10	1.5	20	987.09±62.79	10.33±1.91	108.00±2.83	4975.87±73.57
11	1.5	20	1605.53±84.52	14.68±2.82	268.00±8.49	4528.36±14.50

4.2.2.4 สมการพหุนามระหว่างคุณสมบัติฟิล์มกับปริมาณคาราจีแนน และกลีเซอรอล

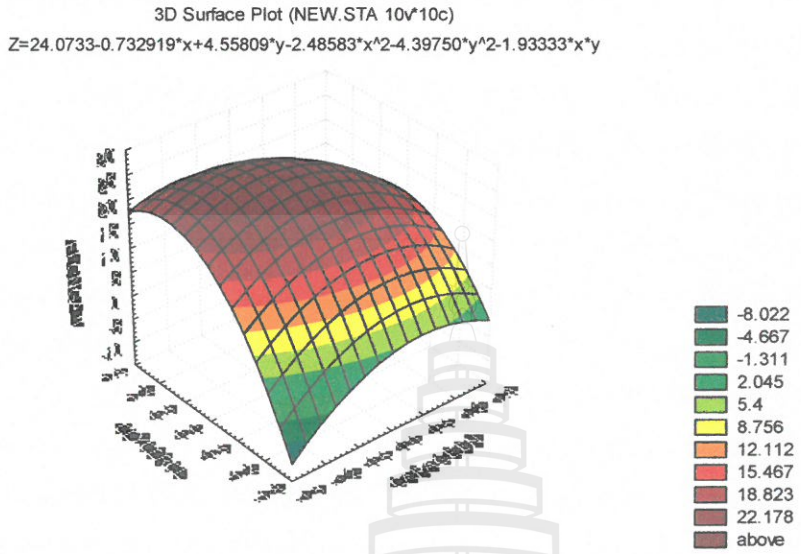
เมื่อนำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอรอลและคาราจีแนน โดยวิธี Regression analysis พบว่าได้สมการพหุนามในรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังสอง ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาราจีแนน (x) และกลีเซอรอล (y) กับคุณสมบัติฟิล์มด้านค่าความชื้น ค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) ความแตกต่างของค่าสี ความหนา ความต้านทานแรงดึงขาด อัตราการยืดตัวและอัตราการซึมผ่านไอน้ำ ดังตาราง 4-11

อย่างไรก็ตามไม่สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาราจีแนน (x) และกลีเซอรอล (y) กับคุณสมบัติฟิล์มด้านความหนา ค่าสีเหลือง (b*) ค่าความทึบแสง (opacity) ค่าความโปร่งใสของฟิล์ม (transparency) และอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนได้

ตาราง 4-11 สมการพหุนามระหว่างคุณสมบัติฟิล์มกับปริมาณคาราจีแนน (x) และกลีเซอรอล (y)

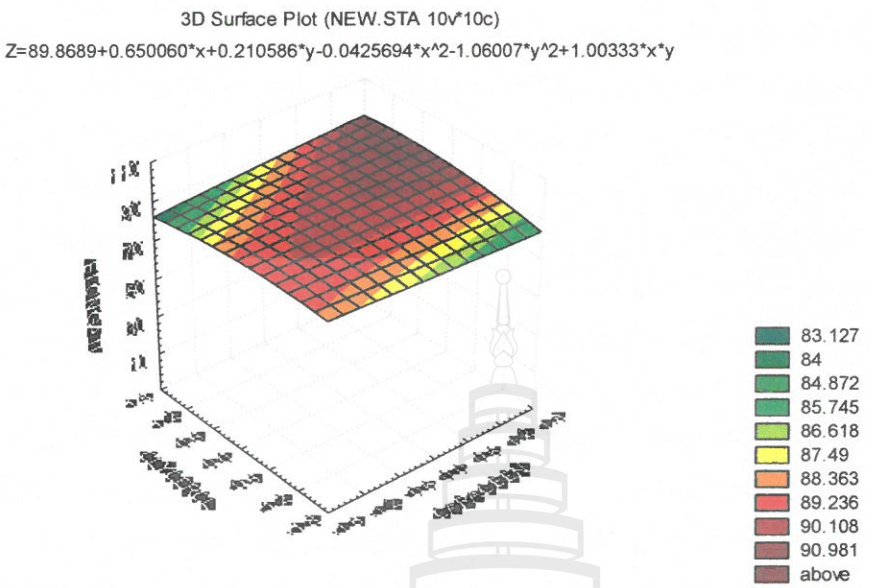
สมการความสัมพันธ์	R^2
ความชื้น = $24.0733-0.7329(x)+4.5581(y)-2.4858(x)^2-4.3975(y)^2-1.9333(xy)$	79.56%
ค่าความสว่าง (L*) = $89.8689+0.6500(x)+0.2106(y)-0.04257(x)^2-1.0601(y)^2+1.0033(xy)$	78.67%
ค่าสีแดง (a*) = $-1.0656- 0.03120(x)+0.0074(y)+0.0299(x)^2+0.0415(y)^2-0.0483(xy)$	95.11%
ความแตกต่างของสี = $3.3682-0.6433(x)-0.2053(y)+0.0516(x)^2+1.0595(y)^2-0.9967(xy)$	78.57%
ความหนา = $64.2222-1.8537(x)-3.1253(y)-0.1194(x)^2+2.7972(y)^2+ 5.0833(xy)$	68.31%
ความต้านทานแรงดึง = $1229.13-172.438(x)-853.833(y)-105.7178(x)^2+441.121(y)^2$ $+713.926(xy)$	90.51%
อัตราการยืดตัว = $11.5522-1.4596(x)+1.9648(y)-2.9778(x)^2-4.5227(y)^2-1.2883(xy)$	78.97%
อัตราการซึมผ่านไอน้ำ = $573.543+19.6664(x)-43.7587(y)-195.417(x^2)$ $+0.248333(y^2)+68.3950(xy)$	74.37%

จากสมการความสัมพันธ์ในตาราง 4-11 สามารถแสดงเป็นเค้าโครงการตอบสนองพื้นผิว (response surface plot) ระหว่างปริมาณคาราจีแนน (x) และกลีเซอรอล (y) กับคุณสมบัติฟิล์มด้านต่างๆ ได้ ดังภาพ 4-5-4-12



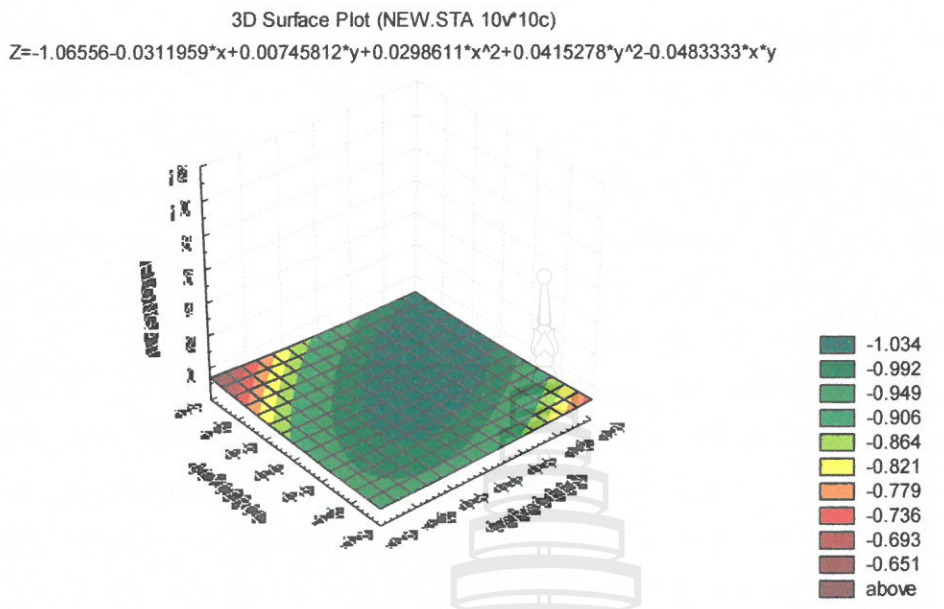
ภาพ 4-6 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของค่าความชื้น

ปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลที่ใช้ในสารละลายเตรียมฟิล์มส่งผลปริมาณความชื้นของฟิล์มที่เตรียมได้อย่างมีนัยสำคัญ (ภาพ 4-6) ค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบของคาราจีแนน (-0.7329) แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณคาราจีแนน ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์เชิงบวกของกลีเซอรอล (+4.5581) แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล ทั้งนี้กลีเซอรอลเป็นสารกลุ่มพอลีออล (polyol) (polyol) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลจึงมีคุณสมบัติดูดน้ำ (hydrophylic) (Carmen et al, 2008) จึงส่งผลทำให้ฟิล์มมีปริมาณความชื้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสมการแสดงให้เห็นว่ามีผลร่วม (interaction) ระหว่างการใช้คาราจีแนนและกลีเซอรอล โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารทั้งสองชนิดในสูตรกลับทำให้ปริมาณความชื้นลดลง สังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบ (-1.9333)



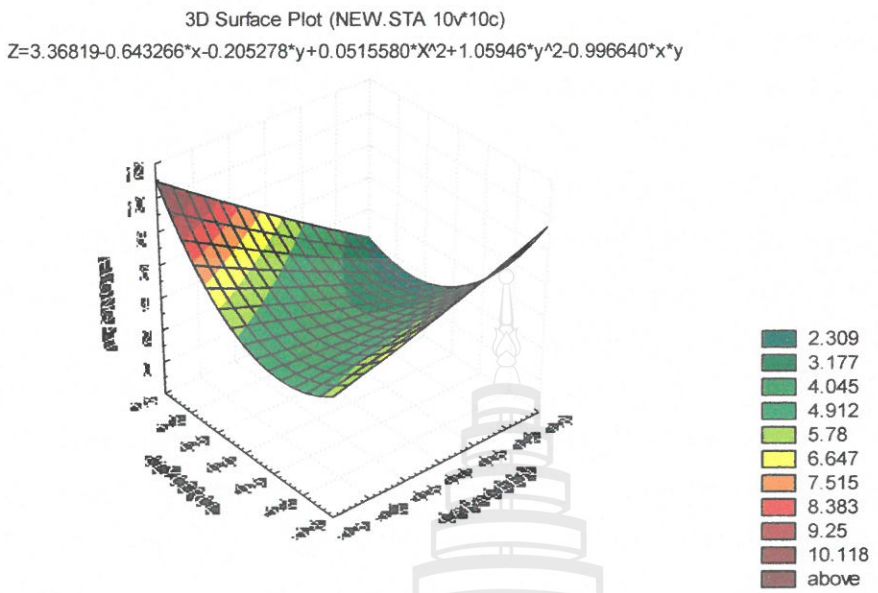
ภาพ 4-7 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของค่าความสว่าง (L*)

การเพิ่มปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลต่อค่าความสว่าง (L*) ของฟิล์มที่เตรียมได้อย่างมีนัยสำคัญ (ภาพ 4-7) โดยทำให้ฟิล์มมีค่าความสว่างเพิ่มมากขึ้น สังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์เชิงบวก ของปริมาณคาราจีแนน (+0.6500) กลีเซอรอล (+0.2106) และผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอล (+1.0033)



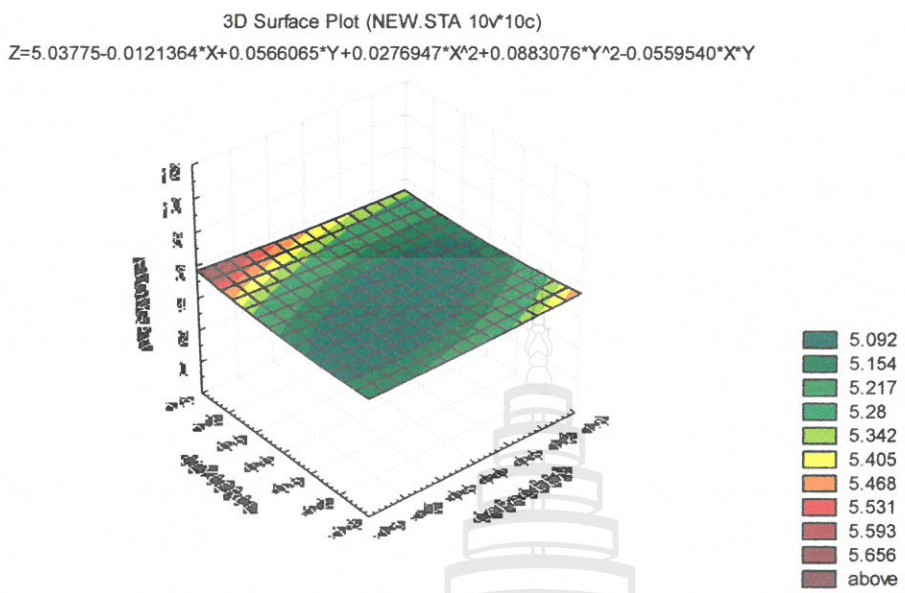
ภาพ 4-8 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของค่าสีแดง (a*)

การเพิ่มปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลต่อค่าสีแดง (a*) ของฟิล์มที่เตรียมได้อย่างมีนัยสำคัญ (ภาพ 4-8) โดยการเพิ่มปริมาณคาราจีแนน ทำให้ฟิล์มมีค่าสีแดงเพิ่มมากขึ้น สังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์เชิงบวก ของปริมาณคาราจีแนน (+0.6500) และกลีเซอรอล (+0.2106) อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์เชิงลบของผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอล (-0.0483) แสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณสารทั้งสองชนิดร่วมกันทำให้ค่าสีแดงลดลงเล็กน้อย



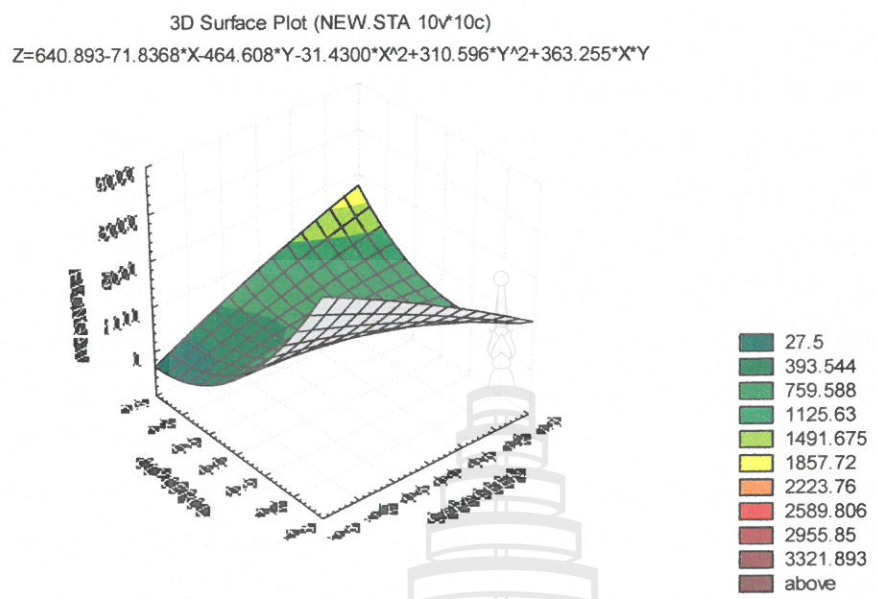
ภาพ 4-9 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของความแตกต่างของสี (Total color difference)

การเพิ่มปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลต่อค่าความแตกต่างของสี (Total color difference) โดยทำให้ค่าความแตกต่างของสีลดลง (ภาพ 4-9) สังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบของปริมาณคาราจีแนน (-0.6433) กลีเซอรอล (-0.2053) อีกทั้งผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอลส่งผลเชิงลบต่อค่าความแตกต่างของสี (-0.9967) ด้วย



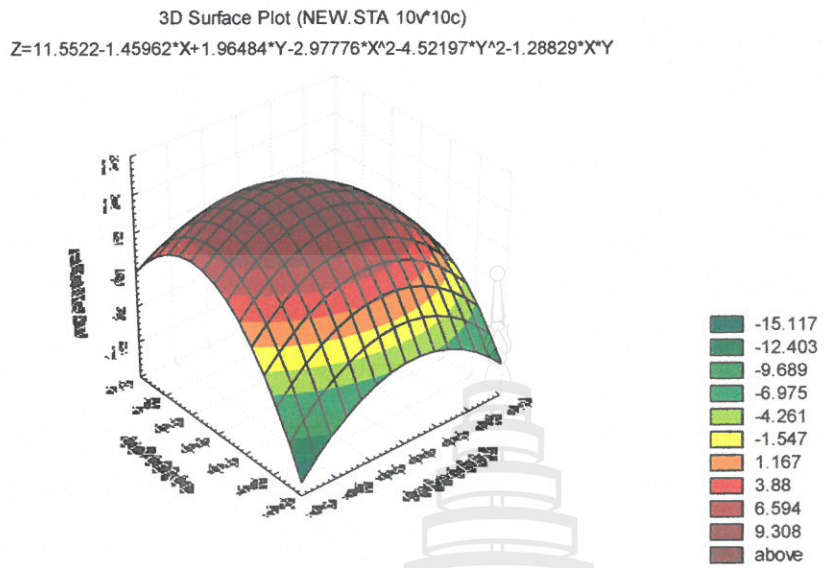
ภาพ 4-10 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของความหนา

การเพิ่มปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลทำให้ความหนาของฟิล์มลดลง (ภาพ 4-10) สังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบของปริมาณคาราจีแนน (-0.1.8537) กลีเซอรอล (-3.1253) อย่างไรก็ตาม ผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอลทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น (+5.0833)



ภาพ 4-11 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของความต้านทานแรงดึง

การเพิ่มปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มลดลง (ภาพ 4-11) เห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์เชิงลบของปริมาณคาราจีแนน (-172.438) กลีเซอรอล (-853.833) ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานที่มีมาก่อนหน้านี้โดย Talja et al (2007) ซึ่งพบว่าการเติมกลีเซอรอลเพื่อทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ในสารละลายฟิล์ม ทำให้ความยืดหยุ่นของฟิล์มเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง อย่างไรก็ตามผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายฟิล์มทำให้ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้น (+713.926)



ภาพ 4-12 เค้าโครงการตอบสนองพื้นผิวของอัตราการยืดตัว

การเติมคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลต่ออัตราการยืดตัวของฟิล์ม (ภาพ 4-12) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณคาราจีแนนจะทำให้อัตราการยืดตัวลดลง (-1.4596) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้อัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้น (+1.9648) อย่างไรก็ตาม ผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอลทำให้อัตราการยืดตัวของฟิล์มลดลง (-1.2883)

การเติมคาราจีแนนและกลีเซอรอลในสารละลายส่งผลต่ออัตราการอัตราการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์ม โดยเมื่อเพิ่มปริมาณคาราจีแนนจะทำให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น (+19.6664) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง (-43.7587) Olivia et al (2008) รายงานผลของการเติมกลีเซอรอลว่าอาจให้ผลได้ทั้งสองทาง กล่าวคือสามารถเพิ่มหรือลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มได้ กรณีแรกเนื่องจากกลีเซอรอลจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติดูดน้ำ (hydrophilic) จึงเพิ่มการซึมผ่านของไอน้ำ กรณีหลังเนื่องจากกลีเซอรอลไปรบกวนการจัดเรียงตัวของเส้นสายโพลีเมอร์สตาร์ช ทำให้โครงสร้างฟิล์มแน่นและลดการซึมผ่านของไอน้ำลง ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับกรณีหลัง อย่างไรก็ตามผลร่วมระหว่างคาราจีแนนและกลีเซอรอลทำให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น (+68.3950) Lopez et al (2008) รายงานว่า การเติมกลีเซอรอลอาจส่งผลทำให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลงหรือเพิ่มขึ้นได้ โดยกลีเซอรอลเข้าไปรบกวนการจัดเรียงตัว

ของเส้นสายพอลิเมอร์สตาร์ชทำให้โครงสร้างฟิล์มแน่นตัวและลดการซึมผ่านของไอน้ำลง ในขณะเดียวกันกลีเซอรอลจะไปเพิ่มคุณสมบัติ hydrophilic ของฟิล์มและเพิ่มอัตราการซึมผ่านไอน้ำ

4.2.2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอล

จากสมการความสัมพันธ์ทั้งหมด พบว่ามีเพียงสองสมการซึ่งเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงและยืดหยุ่นของฟิล์มนั่นคือ ความต้านทานแรงดึง (R^2=90.51) และอัตราการยืดตัว (R^2=78.97) จึงนำมาทำการ Optimization เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของปริมาณคาราจีแนน (x) และกลีเซอรอล (y) ในสารละลายสำหรับขึ้นรูปฟิล์ม โดยกำหนดเกณฑ์ที่ต้องการคือ ฟิล์มต้องมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดและอัตราการยืดตัวสูงสุด ซึ่งทำให้ได้ปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมคือ 16.14% ของน้ำหนักสตาร์ชข้าวดัดแปรและปริมาณคาราจีแนนที่เหมาะสมคือ 1.29% ของน้ำหนักสตาร์ชข้าวดัดแปร

เมื่อนำส่วนผสมของฟิล์มดังกล่าวมาทำการผสมและขึ้นรูปฟิล์ม จากนั้นเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงป้องกันของฟิล์มกับฟิล์มสังเคราะห์สามชนิดได้แก่ ฟิล์มพอลีเอทิลีน(polyethylene) ฟิล์มพอลีโพรไพลีน (polyporpylene)และฟิล์มเซลโลเฟน (cellophane) ผลวิเคราะห์คุณภาพแสดงดังตาราง 4-12

โดยรวมฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปรมีคุณสมบัติคือมีความต้านทานแรงดึงขาดต่ำกว่าฟิล์มพลาสติกสังเคราะห์ทั้งสามชนิด อีกทั้งมีการยืดตัวต่ำกว่าฟิล์มโพลีเอทธิลีนและฟิล์มพอลีโพรไพลีน (polyporpylene)แต่ใกล้เคียงกับฟิล์มเซลโลเฟน ฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปรมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำ แต่มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงเนื่องจากคุณสมบัติ hydrophilic ของสตาร์ชเป็นพื้นฐาน จึงกล่าวได้ว่าฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปร มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นน้อยกว่าฟิล์มพลาสติกสังเคราะห์และมีความสามารถป้องกันน้ำได้ไม่ดี จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติด้านนี้ อย่างไรก็ตามมีข้อดีคือสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของฟิล์มจากสตาร์ชและแป้งจากพืชต่างๆ ที่ได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ (Miller & Krochta, 1997; Olivia et al., 2008)

ตาราง 4-12 คุณสมบัติฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปร เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลีเอทิลีน (polyethylene) พอลีโพรไพลีน (polyporpylene) และเซลโลเฟน

คุณสมบัติของฟิล์ม	ฟิล์มบริโภคได้ที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปร	ฟิล์มพอลิเอทิลีน*	ฟิล์มพอลิโพรไพลีน*	ฟิล์มเซลโลเฟน*
• ความต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength, Mpa)	0.001	19-44	31-38	55-124
• การยืดตัว (Elongation, mm)	12.50	600	100-600	16-60
• สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($cm^3 \mu m/m^2.day$)	8,000	163,000-213,000	146,000	20,000-31,000
• สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอน้ำ (g. $\mu m /m^2.day$)	280,680	375-500	590	43,000

*ข้อมูลอ้างอิงจาก Selke et al., 2004

4.2.2.6 แนวโน้มการนำไปใช้ประโยชน์ของฟิล์มบริโภคได้จากสตาร์ชข้าว

ภาพ 4-13 แสดงลักษณะปรากฏของฟิล์มที่เตรียมได้จากสูตรที่เหมาะสม คือใช้คาราจีแนน 16.14% และกลีเซอรอล 1.29% ของน้ำหนักสตาร์ชข้าวดัดแปร ซึ่งให้ฟิล์มที่มีลักษณะคงตัวและมีความขุ่นเล็กน้อย ภาพที่ 4-14 แสดงการนำฟิล์มไปบรรจุหรือห่อหุ้มอาหารแห้งในรูปแบบต่างๆ ในเบื้องต้นนี้พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปบรรจุหรือห่อหุ้มอาหารแห้งต่างๆ โดยเฉพาะอาหารที่มีส่วนประกอบของไขมันสูง เนื่องจากสามารถป้องกันออกซิเจนได้ดีจึงช่วยชะลอการเหม็นหืนของไขมันในอาหารได้

ภาพ 4-13 ลักษณะปรากฏของฟิล์มที่เตรียมได้จากสูตรที่เหมาะสม

ภาพที่ 4-14 ตัวอย่างการนำฟิล์มไปบรรจุหรือห่อหุ้มอาหารแห้งในรูปแบบต่างๆ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากผลการวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบทำให้ทราบว่าสตาร์ชข้าวมีความเหมาะสมมากกว่าแป้งข้าวในการนำมาเตรียมเป็นฟิล์ม เนื่องจากให้เจลที่แข็งแรงและมีความใสมากกว่า อย่างไรก็ตามการดัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยวิธี Heat-moisture treatment (HMT) ทำให้ได้เจลที่มีความแข็งแรงมากกว่าสตาร์ชข้าวธรรมดา จึงเหมาะสมต่อการนำมาเตรียมเป็นฟิล์มมากกว่า

5.1.2 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตาร์ชข้าวและสตาร์ชดัดแปรในการเตรียมฟิล์มคือ 2.5% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การเติมกลีเซอรอล 10-30% และคาราจีแนน 0.5-1.5% ในสูตรสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นและคงตัวให้แก่ฟิล์มได้ และจากการเปรียบเทียบลักษณะปรากฏของฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวและสตาร์ชข้าวดัดแปร พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปรมีความแข็งแรง คงตัว เนื้อฟิล์มเรียบไม่ยับย่นและลอกออกจากพิมพ์ได้ง่าย ซึ่งเหนือกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวธรรมดา จึงเลือกใช้สตาร์ชดัดแปรเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟิล์มต่อไป

5.1.3 ในการทดลองหาปริมาณคาราจีแนนและกลีเซอรอลที่เหมาะสม พบว่าการผันแปรปริมาณส่วนผสมทั้งสองชนิดส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกายภาพและคุณสมบัติเชิงป้องกันต่างๆกัน โดยสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสอง ระหว่างส่วนผสมทั้งสองชนิดกับคุณสมบัติด้านต่างๆ คือ ค่าความชื้น (R^2=79.56) ค่าความสว่าง หรือ L* (R^2=78.67) ค่าสีแดงหรือ a* (R^2=95.11) ความแตกต่างของค่าสีหรือ total color difference (ΔE) (R^2=78.57) ความหนา (R^2=68.31) ความต้านทานแรงดึงขาดหรือ tensile strength (R^2=90.51) อัตราการยืดตัวหรือ elongation (R^2=78.97) และอัตราการซึมผ่านไอน้ำหรือ water vapor transmission rate (R^2=74.37)

5.1.4 เมื่อนำเอาสมการที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงและความสามรถเชิงป้องกันของฟิล์ม นั่นคือ ความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัว มาทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) โดยกำหนดเกณฑ์ที่ต้องการคือฟิล์มต้องมีความต้านทานแรงดึง

สูงสุดและอัตราการยืดตัวสูงสุด ทำให้ได้ปริมาณกลีเซอรอลและคาราจีแนนที่เหมาะสมคือ 16.14 และ 1.29%% ของน้ำหนักสตาร์ชข้าวดัดแปร ตามลำดับ

5.1.5 แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชดัดแปร 2.5% โดยน้ำหนัก กลีเซอรอลและคาราจีแนน 16.14 และ 1.29% ของน้ำหนักสตาร์ชข้าวดัดแปร มีคุณสมบัติเด่นคือสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี แต่มีข้อด้อยคือมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นน้อยกว่าฟิล์มพลาสติกสังเคราะห์ และมีความสามารถป้องกันน้ำได้ไม่ดี ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารบางประเภท จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติด้านการป้องกันน้ำเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มบริโภคได้จากสตาร์ชดัดแปรอาจเหมาะที่จะเป็นบรรจุภัณฑ์ชั้นใน (secondary packaging) สำหรับอาหารแห้ง โดยเฉพาะอาหารที่มีปริมาณไขมันสูง เนื่องจากสามารถป้องกันก๊าซออกซิเจน ได้ดี จึงช่วยป้องกันหรือชะลอการเหม็นหืนได้

5.2 ข้อสังเกตและข้อเสนอแนะ

จากข้อสังเกตของผู้วิจัย มีความเป็นไปได้ในการนำสารละลายฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชข้าวดัดแปร กลีเซอรอลและคาราจีแนน มาขึ้นรูปเป็นแคปซูลสำหรับบรรจุยา ซึ่งอาจเพิ่มรูปแบบในการใช้ประโยชน์ของวัตถุดิบข้าวได้ในอีกแนวทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติม โดยเน้นการพัฒนาคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการสำหรับแคปซูลยา เช่น คุณสมบัติในการละลาย เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ, น.166-168.

นิธิยา รัตนาปนนท์ (2539). เคมีอาหาร. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2550). สถิติการเกษตรของประเทศไทย (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://www.oae.go.th/statistic/yearbook50/ (21 พฤศจิกายน 2554)

AACC, (1999). In: AAOC Chemists (Ed.), Insoluble Dietary Fiber Association of Cereal Chemists. The American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota.

Arvanitoyannis, I., Psomiadou, E., & Nakayama, A. (1996). Edible films made from sodium caseinate, starches, sugars or glycerol. Part 1. Carbohydrate Polymers 31(4): 179–192.

Arvanitoyannis, I., & Biliaderis, C. G. (1999). Physical properties of polyol-plasticized edible blends made of methyl cellulose and soluble starch. Carbohydrate Polymers 38: 47–58.

ASTM. (2009). Standard Guide for Determination of Thickness of Plastic Film Test Specimens, method ASTM D6988-08, In Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

ASTM. (2009). ASTM, Standard Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheeting, method ASTM D1434-82, In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.

ASTM. (2009). ASTM, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, method ASTM E96 / E96M, In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.

ASTM. (2009). ASTM Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, method ASTM D882-09, In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA.

Bae H.J., Cha D.S., Whiteside W.S., Park H. J. (2008). Film and pharmaceutical hard capsule formation properties of mungbean, waterchestnut, and sweet potato starches. Food Chemistry 10, 696–105.

Bemiller, J.N., (1997). Starch modification: challenges and prospects. Starch 49: 127-131

Bertuzzi, M.A., Armada, M., Gottifredi, J.C. (2007). Physicochemical characteristics of starch based film. Journal of food engineering 82: 17-25.

Carmen M.O. Carmen, Fabio Yamashita, Joa˜o Borges Laurindo, (2008). Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach. Carbohydrate Polymers 72: 82–87

Chinabhark. K, Benjakul. S, Prodpran. T. (2007). Effect of pH on the properties of protein-based Wlm from bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) surimi. Bioresource Technology 98: 221–225

Dias Amanda. B., Carmen Carmen M.O., Larotonda Fabio D.S., Laurindo Joa˜o B. (2010). Biodegradable films based on rice starch and rice flour. Journal of Cereal Science 51: 213–219.

Forssell, P., Lahtinen, R., Lahelin, M., & Myllarinen, P. (2002). Oxygen permeability of amylose and amylopectin films. Carbohydrate Polymers 47: 125–129.

Garcıa, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. (2000). Microstructural characterization of plasticized starch-based films. Starch/Starke 52(4): 118–124.

Gilleland, G. M., Turner, J. L., Patton, P. A., & Harrison, M. D. (2001). Modified starch as a replacement for gelatin in soft gel films and capsules. World intellectual Property Organization. International Patent Number, WO 01/91721 A2.

Gunaratne, A., & Hoover, R. (2002). Effect of heat-moisture on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymers 49: 425–437

Hernandez O., Emaldi U., Tovar J. 2008. In vitro digestibility of edible films from various starch sources. Carbohydrate Polymers 71: 648-655.

Hormdok R & Noomhorm A. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. LWT - Food Science and Technology 40 (10): 1723-1731

Juliano, B.O. (1971). A simplified assay for milled-rice amylose, Cereal Science Today, 16, pp. 334–340.

Juliano, B.O. (1984). Rice starch: production, properties and uses. In Starch (ad. R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschell). pp. 507-523). London: Academic Press.

Krochta, J. M., & Sothornvit, R. (2001). Plasticizer effect on mechanical properties of b-lactoglobulin films. Journal of Food Engineering 50: 149–155.

Lawton, J. W. (1996). Effect of starch type on the properties of starch containing films. Carbohydrate Polymers 29: 203–208.

Lafargue,D., Lourdin, D. & Doublier J.L. (2007). Film-forming properties of a modified starch/k-carrageenan mixture in relation to its rheological behaviour. Carbohydrates Polymers 70: 101-111.

Li Y., Shoemaker C. F., Ma J., Shen X., Zhong F. (2008). Paste viscosity of rice starches of different amylose content and carboxymethylcellulose formed by dry heating and the physical properties of their films Food Chemistry 109: 616–623.

Lourdin, D., Della Valle, G., & Colonna, P. (1995). Influence of amylase content on starch films and foams. Carbohydrate Polymers 27:261–270.

Miller, K.S. & and Krochta J.M. (1997). Oxygen and aroma barrier properties of edible films: A review. Trends in Food Science & Technology 8 (7): 228-237.

Olivia V. López, María A. García, Noemí E. Zaritzky. (2008). Film forming capacity of chemically modified corn starches. Carbohydrate Polymers 73(4): 573-581.

Qingjie Sun, Lei Dai, Chong Nan, & Liu Xiong. (2014). Effect of heat moisture treatment on physicochemical and morphological properties of wheat starch and xylitol mixture. Food Chemistry 143: 54–59

Rindlav, A , Hulleman, S. H. D., & Gatenholm, P. (1997). Formation of starch films with varying crystallinity. Carbohydrate Polymers 34(1-2): 25–30.

Santhanee Puncha-arnon & Dudsadee Uttapap. (2013). Rice starch vs. rice flour: Differences in their properties when modified by heat–moisture treatment. Carbohydrate Polymers 91: 85– 91

Selke S. E. M., Culter J. D., & Hernandez R. J. (2004). Plastic packaging: properties, processing, applications and regulations (2nd edition). Hanser Publisher, Munich.

Shih, F., & Daigle, K. (1999). Oil uptake properties of fried batters from rice flour. Journal of agriculture and food chemistry 47: 1611-1615.

Talja R. A., Helen H., Roos Y. H., Jouppila K. (2007). Effect of various polyols and polyol contents on physical and mechanical properties of potato starch-based films. Carbohydrate Polymers 67: 288–295

Tharanathan, R.N. (2003). Biodegradable films and composite coating: Past, present and future. Food Science and Technology 14: 71-78.

Woltjes, Jakob, Roelf, Meima, Heine, Buwalda et al. (1999). Composition based on cross-linked starch and depolymerized starch suitable as gelatin replacement. World Intellectual Property Organization, International Patent Number WO 00/44241.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - สกุล นาง รุ่งอรุณ สาสนทาญาติ

   Mrs. Rungarun Sasanatayart

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการผลิตผลเกษตรและการบรรจุ สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

   ที่อยู่ 333 ม. 1 ต. ท่าสุด อ. เมือง จ. เชียงราย 57100

   โทรศัพท์ 053-916-754 โทรสาร 053-916-739

   E-mail address rungarun.s@mfu.ac.th

3. ประวัติการศึกษา

   วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2539)

   วท.ม. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2545)

   ปร.ด. (วิศวกรรมอาหารและเทคโนโลยีกระบวนการทางชีวภาพ) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (2550)

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - สกุล นายดำรงพล คำแหงวงศ์

   Mr. Damrongpol Kamhangwong

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการผลิตผลเกษตรและการบรรจุ สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

   ที่อยู่ 333 ม. 1 ต. ท่าสุด อ. เมือง จ. เชียงราย 57100

   โทรศัพท์ 053-916-751 โทรสาร 053-916-739

   E-mail address damrongpol1234@yahoo.com , damrongpol1234@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

   วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ (2542)

   วท.ม. (เทคโนโลยีการบรรจุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2549)