

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรส์ต่อสมบัติของฟิล์มพลาสติก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติก จากการปั่นแยกจากเม็ดเลือดและทำแห้งแบบฟอสเฟต พบว่าพลาสติกที่ได้มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 77.81 โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก และมีไขมันร้อยละ 0.12 ความชื้นร้อยละ 13.63 และเถ้าร้อยละ 14.46 อย่างไรก็ตามองค์ประกอบโปรตีนยังมีการเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาและสภาพในช่วงระหว่างการฆ่า (วารินทร์ พิมพา, 2547) รวมทั้งสภาวะการเก็บรักษาหลังจากการทำแห้ง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้พลาสติกเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตฟิล์มบริโภคได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มที่บริโภคได้ คือ ชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรส์ โดยเลือกศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอรส์ 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และ พอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 (น้ำหนัก/น้ำหนัก พลาสติก) และการใช้ร่วมกันของกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับซอร์บิทอล และ กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 (น้ำหนัก/น้ำหนักพลาสติก) และตรวจวัดสมบัติของฟิล์มได้แก่ ความหนา ความโปร่งแสง การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว ความชื้น การซึมผ่านไอน้ำ การละลาย และค่าสี คือ ค่า L^* และค่า b^*

ผลของกลีเซอรอล

ความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีผลต่อความหนาของฟิล์มพลาสติก ดังแสดงในตาราง 1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล ฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยในการทดลองนี้ฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 60 พบว่ามีความหนามากที่สุด และมีความหนามากกว่าฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 64.98 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากธรรมชาติของกลีเซอรอลที่มีความเป็นขี้ผึ้ง โครงสร้างใหญ่ และมีหมู่ไฮดรอกซิลมาก จึงสามารถละลายและแทรกเข้าไปจับยึดกับโมเลกุลของโปรตีนได้ดี ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนแอลง และการเชื่อมประสานกันระหว่างกลีเซอรอลกับโปรตีน ส่งผลให้ฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลสูง ๆ จะมีเนื้อฟิล์มที่นุ่มและหนากว่า

(ปนัดดา พวงเกษม, 2540) ผลจากการทดลองพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Miranda et al. (2004) ที่ศึกษาผลของกลีเซอรอลในฟิล์มไคโตแซน และพบว่าฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20.92 เป็น 30.49 เมื่อเพิ่มกลีเซอรอลจากความเข้มข้น ร้อยละ 0.3 เป็น 0.6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ความโปร่งแสงเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของฟิล์มที่ต้องคำนึงถึง เพราะเมื่อมีการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์จะสามารถบอกถึงลักษณะปรากฏที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ถูกห่อหุ้ม จากการทดลองพบว่าความหนาของฟิล์มมีผลต่อสมบัติความโปร่งแสง โดยฟิล์มมีความโปร่งแสงลดลงเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มที่มีกลีเซอรอลร้อยละ 60 มีความโปร่งแสงน้อยกว่าฟิล์มที่มีกลีเซอรอลร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 53.74 ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลสามารถละลายและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายพลาสมาโปรตีน ทำให้ความหนาแน่นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความทึบแสงมากขึ้น (Isissin-Mangata et al., 2001; Cuq, Gontard & Guilbert, 1996) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Shaw et al. (2002) ที่รายงานว่าฟิล์มเวย์โปรตีนมีความโปร่งแสงลดลงจากร้อยละ 26.08 จนถึง 17.27 เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจากร้อยละ 0.5 เป็น 0.7

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกลีเซอรอลมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางกลของฟิล์ม ซึ่งในที่นี้แสดงด้วยค่าการต้านทานแรงดึงขาด และการยืดตัว โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจะทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง ในขณะที่มีการยืดตัวเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มพลาสมาโปรตีนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20-30 มีการต้านทานแรงดึงขาดมากกว่าความเข้มข้นร้อยละ 50-60 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มโปรตีนทั่วไปมีลักษณะเปราะ เพราะพันธะที่จับกันอย่างแข็งแรงของโปรตีนไม่ยืดหยุ่นเท่าที่ควร (รัตนดา จินดาพรณ, จิรนาถ บุญคง และ จีรศักดิ์ แก้วเกิด, 2548) แต่กลีเซอรอลซึ่งเป็นสารประเภทพอลิออลที่ชอบน้ำ จะเข้าไปจับกับตำแหน่งที่มีขั้วที่เป็น hydrophilic site บนโมเลกุลของโปรตีนได้ส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโปรตีน และลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของโปรตีนกับโปรตีน ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลของโปรตีนเพิ่มขึ้น (วารินทร์ พิมพา, 2547; รัตนดา จินดาพรณ, จิรนาถ บุญคง และ จีรศักดิ์ แก้วเกิด, 2548; Schou et al., 2005) และจากลักษณะของเนื้อฟิล์มที่มีความนุ่ม จึงทำให้โมเลกุลของโปรตีนขยายและยืดออกได้มากขึ้น โดยฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 50-60 มีการยืดตัวมากกว่าฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 20-40 ประมาณร้อยละ 66 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Choi & Han (2001) ที่รายงานว่าฟิล์มโปรตีนถั่ว (pea protein concentrate) ที่เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20-40 โดยใช้อัตราส่วนโปรตีนถั่ว:กลีเซอรอลเท่ากับร้อยละ 80/20, 70/30 และ 60/40 พบว่าฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลงและมีการยืดตัวเพิ่มขึ้น

โดยฟิล์มจะมีความแข็งแรงและยืดขยายได้มากที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนโปรตีนตัว:กลีเซอรอลเท่ากับ ร้อยละ 70/30 และ 60/40 และในทำนองเดียวกันกับ รัตนา จินดาพรรณ, จิรนาถ บุญคง และ จีรศักดิ์ แก้วเกิด (2548) ที่พบว่าฟิล์มโปรตีนตัวเขียวมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลงเมื่อปริมาณ กลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดลองในระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 ถึง 50

เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่ไวต่อความชื้น มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (มวลโมเลกุล 92) และมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี จึงทำให้ก๊าซและไอน้ำแพร่ผ่านได้ดีขึ้น เมื่อโมเลกุลของไอน้ำสามารถ เคลื่อนที่ได้ง่าย จึงทำให้ไอน้ำแทรกเข้าไปในร่างแหของฟิล์ม (วิชชา บัวชุม, 2545; Sothornvit & Krochta, 2000b) ทำให้ฟิล์มซึ่งมีปริมาณความชื้นมากขึ้น เมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Mahmoud & Savello (1992) ที่ศึกษาการใช้กลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น ร้อยละ 0.125 ถึง 2.0 ในฟิล์มเวย์โปรตีน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 28 (Irissin-Mangata et al., 2001; Laohakunjit & Noomhorm, 2004) ในขณะเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลจากร้อยละ 20 จนถึงร้อยละ 60 จะให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 83.81 สอดคล้องกับสมบัติทางกลของฟิล์ม พลาสมาโปรตีนที่ยืดตัวเพิ่มขึ้น ทำให้มีการต้านทานแรงดึงขาดลดลง ส่งผลให้โมเลกุลของโปรตีน ขยายออก เป็นการเพิ่มช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่เป็นรูพรุนให้ขยายตามไปด้วย ไอน้ำจึงซึมผ่านได้ ง่าย ในทำนองเดียวกัน Schou et al. (2005) รายงานว่า ฟิล์มไฮเดียมเคซีนที่มีการซึมผ่านไอน้ำ การยืดตัวและความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เมื่อใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ โปรตีนในช่วง 0.08-0.32 โดยน้ำหนัก และ McHugh, Auard & Krochta (1994) รายงานว่าจาก การใช้กลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0-60 ในฟิล์มเวย์โปรตีน เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอล เพิ่มขึ้นการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0.6 ถึง 7.6 กรัม.มิลลิเมตร/กิโลปาสกาล.ชั่วโมง.เมตร²

เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายของฟิล์มพลาสมาโปรตีน ซึ่งแสดงด้วยค่าการ ละลายได้ ของฟิล์มพลาสมาโปรตีน พบว่าการใช้ความเข้มข้นกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีการ ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่มีกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 50 และ 60 มีการละลายมากกว่า กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 36.61 และ 32.65 ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้นอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วสูงของกลีเซอรอลที่สามารถละลาย น้ำได้ดี จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับส่วนที่มีขั้วของโครงสร้างของฟิล์ม (Miranda et al., 2004) เป็นสาเหตุให้โครงสร้างที่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและพันธะไดซัลไฟด์ เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้พันธะเกิดการคลายตัวและปฏิกิริยาที่กระทำระหว่างกันลดลง ทำให้ ฟิล์มมีการละลายเพิ่มขึ้น (Cho & Rhee, 2004; Bourtoom, Jantawat & Sanguandeeikul, 2006)

สำหรับสีของฟิล์มในที่นี้รายงานด้วยค่า L^* (ความสว่าง) และค่า b^* (เป็นช่วงสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน) พบว่าเนื้อฟิล์มจะมีลักษณะใสค่อนข้างเหลือง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล ไม่มีผลต่อความสว่างและสีของฟิล์ม ถึงแม้ว่าฟิล์มจะมีค่า L^* ลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ในช่วงความเข้มข้นของกลีเซอรอล (20-60%) ที่ศึกษา ซึ่งการเกิดสีของฟิล์มนั้นอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยา Maillard reaction กับกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของพลาสมาโปรตีน และยังขึ้นกับขั้นตอนการแยกผงพลาสมาโปรตีนเช่นกัน (วารินทร์ พิมพา, 2547)

ผลของซอร์บิทอล

จากคุณสมบัติของซอร์บิทอลที่มีความเป็นขั้วสูงกว่ากลีเซอรอล ขนาดโครงสร้างใหญ่ มีหมู่ไฮดรอกซิลมาก และมีสายโมเลกุลเป็นเส้นตรง จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี (Sothornvit & Krochta, 2000a) ทำให้ร่างแหของโปรตีนแยกจากกัน จากการทดลองเมื่อทำการลอกแผ่นฟิล์ม พบว่าแผ่นฟิล์มมีลักษณะเปราะบางและแตกได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน และเนื้อฟิล์มยังมีลักษณะค่อนข้างใส ผิวหน้ามีความมันวาวมากกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล ในทำนองเดียวกันกับฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซอร์บิทอลฟิล์มจะมีความหนามากขึ้น ในขณะที่มีความโปร่งแสงลดลง และฟิล์มมีการละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดและปริมาณของซอร์บิทอลจะเชื่อมต่อให้เกิดโครงสร้างตาข่ายกับโปรตีนได้ไม่ดี จึงเป็นผลให้ซอร์บิทอลละลายได้ดีกว่ากลีเซอรอล และซอร์บิทอลมีองค์ประกอบโครงสร้างเป็นวงแหวน ขณะที่กลีเซอรอลเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่ตรงจึงสนับสนุนให้เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโปรตีนกับโปรตีนได้ (เถวียน บัวตุ้ม, 2546) ทำให้โครงสร้างตาข่ายของฟิล์มซอร์บิทอลไม่มีความหนาแน่นพอ สอดคล้องกับผลการทดลองของ เถวียน บัวตุ้ม (2546) ที่ศึกษาผลของพลาสมาไฮดรอลิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 25-75 น้ำหนัก/น้ำหนัก ต่อฟิล์มโปรตีนจากปลา และพบว่าฟิล์มมีการละลายน้ำได้สูงกว่าการใช้กลีเซอรอล โดยการละลายจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของซอร์บิทอลที่เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของซอร์บิทอลมีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์ม ซึ่งแตกต่างจากการใช้กลีเซอรอล โดยพบว่าการใช้ซอร์บิทอลในช่วงที่ทำการศึกษาร้อยละ 20-60 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการต้านทานแรงดึงขาดและค่าการยืดตัว ($P < 0.05$) โดยฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลจะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดอยู่ในช่วง $20.40-21.90 \times 10^{-2}$ กิโลกรัม/มิลลิเมตร² และให้ค่าการยืดอยู่ในช่วงร้อยละ 17.14-24.65 ซึ่งมีการยืดตัวต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน จึงทำให้ฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลมีความยืดหยุ่นต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล ทั้งนี้จะเป็น

เพราะซอร์บิทอลเป็นสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่ากลีเซอรอล ดังนั้นจึงเกิดพันธะกับไฮโดรเจนที่ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีช่องว่างโมเลกุลน้อยกว่า (Jangchud & Chinnan, 1999) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Cho & Rhee (2002) ที่รายงานว่า การเติมซอร์บิทอลลงในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองจะให้ฟิล์มที่มีการต้านทานแรงดึงขาดสูงแต่มีการยืดตัวได้ต่ำกว่าการใช้กลีเซอรอล เมื่อใช้ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.3, 0.5 และ 0.7 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) นอกจากนั้นซอร์บิทอลยังเป็นสารที่สามารถเก็บรักษาความชื้นได้ดี (humectant) จึงทำให้ดูดซับความชื้นในอากาศ (hygroscopic) ได้น้อยกว่ากลีเซอรอล การแพร่ผ่านของไอน้ำระหว่างช่องว่างโมเลกุลจึงมีอย่างจำกัด (Cho & Rhee, 2002; Thomazine, Carvalho & Sobral, 2005) จึงทำให้ฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลมีการซึมผ่านไอน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอล และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซอร์บิทอล ฟิล์มจะมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลงจาก 5.42×10^{-4} เป็น 4.42×10^{-4} กรัม.มิลลิเมตร/เมตร².ชั่วโมง.กิโลปาสคาล สำหรับฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 60 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Miranda et al. (2004) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซอร์บิทอลจากร้อยละ 0.3 เป็น 0.6 ในฟิล์มโคโคแทนจะทำให้ฟิล์มมีการซึมผ่านไอน้ำลดลงจาก 145.67 ไปเป็น 133.24 กรัม/ชั่วโมง.เมตร²

อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณซอร์บิทอลในระดับความเข้มข้นที่ศึกษา (20-60%) ไม่มีผลต่อสีของฟิล์ม ($P < 0.05$) แต่ฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลจะมีความสว่างมากกว่าโดยให้ค่า L^* อยู่ในช่วง 6.96-14.17 ในขณะที่ใช้กลีเซอรอลฟิล์มจะมีค่า L^* อยู่ในช่วง 6.35-9.49

ผลของการใช้ร่วมกันของกลีเซอรอลและซอร์บิทอล

จากตาราง 3 พบว่าการใช้ร่วมกันเติมซอร์บิทอลในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 10-30 กับกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ไม่มีผลต่อความหนา ความชื้น ความโปร่งแสง รวมทั้งการละลายของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของฟิล์ม โดยทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง เมื่อเติมซอร์บิทอล ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว (ฟิล์มควบคุม) ในขณะที่เมื่อเติมซอร์บิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 ไม่มีผลต่อการยืดตัว ($P < 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซอร์บิทอลเป็นร้อยละ 30 จะทำให้ฟิล์มมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 31.87 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของซอร์บิทอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี ซอร์บิทอลจึงไปแทรกจับกับโมเลกุลของกลีเซอรอล และโปรตีนในสารละลาย จึงทำให้เกิดการจับกันของร่างแหได้ดีขึ้น ฟิล์มจึงมีความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้กลีเซอรอลเพียงชนิดเดียว (เถวียน บัวตุ้ม, 2546; Cho & Rhee, 2002) สอดคล้องกับการรายงานของ Thomazine et al. (2005) ที่รายงานว่าฟิล์มเจลลาตินที่ใช้กลีเซอรอลร่วมกับซอร์บิทอลที่อัตราส่วน 0:100, 20:80, 40:60, 60:40, 80:20 และ

100:0 ในปริมาณ 25-55 กรัม พบว่าเมื่อใช้ซอร์บิทอลเพิ่มขึ้น จะทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่การต้านทานแรงดึงขาดลดลง

นอกจากนั้นการเติมซอร์บิทอลยังส่งผลทำให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง โดยเมื่อเติมซอร์บิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 จะทำให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลงในช่วงร้อยละ 10.93-17.67 ($P < 0.05$)

สำหรับฟิล์มที่เติมซอร์บิทอลจะมีเนื้อฟิล์มที่มีลักษณะใสออกเหลือง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซอร์บิทอลในช่วงร้อยละ 10-30 ทำให้เนื้อฟิล์มมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ฟิล์มจึงมีค่าความสว่างลดลง โดยมีความสว่างน้อยกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียวถึงร้อยละ 20.49 อย่างไรก็ตามการเติมซอร์บิทอล ไม่มีผลต่อค่า b^* ของฟิล์ม ถึงแม้ว่าฟิล์มจะมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น (yellowness) ตามความเข้มข้นของซอร์บิทอลที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) กับฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว

ผลของการใช้ร่วมกันของกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล 400

จากการทดลองพบว่าการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20-60 ไม่เหมาะสมกับการใช้เป็นพลาสติกไฮดรอกซีสำหรับฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลน้อย (Liu, Latona & Dimaio, 2002) เมื่อใช้ในปริมาณมากการละลายจึงเกิดได้ไม่สมบูรณ์ การแทรกตัวและยึดจับกับโมเลกุลของโปรตีนจึงเกิดยากขึ้น และการเสริมประสานกันกับร่างแหของโปรตีนเกิดได้ไม่ดี (Laohakunjit & Noomhom, 2004; Liu, Latona & Dimaio, 2002) ทำให้เกิดลักษณะคล้ายผลึกบนแผ่นฟิล์ม ไม่สามารถลอกเป็นแผ่นได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงปรับเปลี่ยนมาใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 ร่วมกับกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4 พบว่าการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ลงในกลีเซอรอลไม่มีผลต่อความหนา ความชื้น ความโปร่งแสง และการเปลี่ยนแปลงของค่าสีของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ทั้งการต้านทานแรงดึงขาด และการยืดตัว โดยฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่ยืดหยุ่นมากกว่า ฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว ฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ฟิล์มจะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลงมากถึงร้อยละ 47.81 แต่มีค่าการยืดตัวเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 41.52 เมื่อเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ในระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตัวหนึ่ง ทำให้โครงสร้างของฟิล์มยึดเหนี่ยวกันได้ดีเมื่อมีการยืดขยายตัว (Shaffer & Chitchfield, n.d.) อย่างไรก็ตาม

ก็ตามไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ของการยึดตัวเมื่อเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ระดับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 10-30

เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่ดูดความชื้นในอากาศได้ดี (hygroscopic) (Wan & Lee, 2005) เมื่อใช้ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ซึ่งเป็นสารที่เก็บรักษาความชื้นได้ดี (humectant) (Liu et al., 2002) และมีความเป็นไฮโดรโฟบิกซึ่งไม่ชอบจับกับน้ำมากกว่ากลีเซอรอล (โดยเปรียบเทียบจากจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล) (Aydinli & Tutas, 2000) จึงทำให้ฟิล์มที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 มีการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่าฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียวถึงร้อยละ 40 ($P < 0.05$) ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาของ Wan & Lee (2005) ที่พบว่าการใช้กลีเซอรอลร่วมกับโพรพิลีนไกลคอล, พอลิเอทิลีนไกลคอล, ซอร์บิทอล และซูโครส ที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง เมื่อใช้ปริมาณพอลิเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีการซึมผ่านไอน้ำลดลง และลดลงมากกว่าฟิล์มที่ใช้พลาสติกไฮดรอตัวใดตัวหนึ่งเพียงชนิดเดียว และการศึกษาของ Tomasula, Yee & Parris (2003) ที่ศึกษาว่าการใช้ฟิล์มเคซีนและเคซีนดัดแปลงร่วมกับกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่อัตราส่วน 3:1 เปรียบเทียบกับฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว พบว่าฟิล์มเคซีนที่ใช้ร่วมกับกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอลมีการซึมผ่านไอน้ำลดลงจาก 143.8 เหลือ 73.6 และฟิล์มเคซีนดัดแปลงที่ใช้ร่วมกับกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอลมีการซึมผ่านไอน้ำลดลงจาก 85.6 เหลือ 67.9 กรัม.มิลลิเมตร/กิโลปาสคาล.ชั่วโมง.เมตร²

นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 มีผลต่อการละลายของฟิล์ม โดยเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ฟิล์มพลาสติกโปรตีนจะมีการละลายเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ไปขัดขวางการเกิดเครือข่ายของโครงร่างตาข่ายของฟิล์มโปรตีน โดยฟิล์มที่มีพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 มากกว่าจึงมีความแข็งแรงของเครือข่าย (network) น้อยกว่า โปรตีนจึงสามารถละลายได้ดีขึ้น

ตาราง 1 สมบัติของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรอลเพิ่มความเข้มข้นร้อยละ 20-60 โดยน้ำหนักของพลาสติกมาโปรตีน

คุณสมบัติ	กลีเซอรอล (ร้อยละ)				
	20	30	40	50	60
ความหนา (ไมโครเมตร)	38.89 ^c ±1.27	43.88 ^c ±3.36	45.33 ^{bc} ±2.52	50.83 ^b ±6.01	64.16 ^a ±2.89
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	21.89 ^c ±1.56	21.32 ^c ±1.99	21.40 ^c ±0.59	26.55 ^b ±0.41	37.02 ^a ±4.16
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.47 ^c ±0.05	1.30 ^{abc} ±0.02	1.13 ^{bc} ±0.03	0.98 ^c ±0.17	0.68 ^d ±0.03
การต้านทานแรงดึงขาด ($\times 10^{-2}$ กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	21.70 ^a ±1.35	21.10 ^a ±3.47	17.03 ^{ab} ±3.57	15.60 ^b ±1.96	15.50 ^b ±1.35
การยืดตัว (ร้อยละ)	38.98 ^b ±11.3	39.75 ^b ±4.56	41.37 ^b ±1.69	66.42 ^a ±16.3	67.88 ^a ±13.8
การซึมผ่านไอน้ำ ($\times 10^{-4}$ กรัม/มิลลิเมตร/เมตร ² . ชั่วโมง/กิโลปาสคาล)	5.87 ^c ±0.85	6.33 ^c ±0.59	8.76 ^b ±0.14	9.72 ^{ab} ±0.89	10.79 ^a ±0.51
การละลายลาย (ร้อยละ)	19.42 ^b ±4.54	22.35 ^{ab} ±0.79	23.06 ^{ab} ±0.42	26.53 ^a ±0.28	25.76 ^a ±2.55
ค่าสี					
L*	9.49 ^{ns} ±2.44	6.83 ^{ns} ±1.69	6.97 ^{ns} ±1.49	6.32 ^{ns} ±1.44	6.96 ^{ns} ±1.45
b*	-1.13 ^{ns} ±2.47	-1.03 ^{ns} ±1.24	-1.01 ^{ns} ±1.13	-1.62 ^{ns} ±1.28	1.22 ^{ns} ±1.67

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตาราง 2 สมบัติของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนเมื่อใช้ชอร์บิทอลเป็นพลาสติกไฮเทรทที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20-60 โดยน้ำหนักของพลาสติกมาโปรตีน

คุณสมบัติ	ชอร์บิทอล (ร้อยละ)				
	20	30	40	50	60
ความหนา (ไมโครเมตร)	39.44 ^c ±1.27	40.00 ^c ±3.00	43.05 ^c ±2.09	50.83 ^b ±3.63	56.66 ^b ±1.44
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	18.91 ^b ±0.38	18.72 ^b ±0.66	18.60 ^b ±1.26	19.76 ^b ±0.86	21.67 ^b ±1.43
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.11 ^a ±0.13	1.01 ^{ab} ±0.06	0.94 ^{bc} ±0.07	0.86 ^{bc} ±0.02	0.84 ^c ±0.05
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	20.56 ^{ns} ±3.26	21.89 ^{ns} ±0.10	21.90 ^{ns} ±1.75	20.50 ^{ns} ±3.04	20.40 ^{ns} ±7.81
การยืดตัว (ร้อยละ)	17.14 ^{ns} ±2.66	21.02 ^{ns} ±4.73	23.94 ^{ns} ±6.35	24.65 ^{ns} ±17.4	24.19 ^{ns} ±5.00
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻⁴ กรัม.มิลลิเมตร/เมตร ² .ตัว.มม.กิโปลาสดาล)	5.42 ^a ±0.53	5.18 ^a ±0.13	4.89 ^{ab} ±0.05	4.28 ^b ±0.25	4.42 ^b ±0.42
การละลาย (ร้อยละ)	25.55 ^c ±4.04	23.49 ^c ±4.09	28.13 ^{bc} ±1.22	33.91 ^b ±1.11	41.63 ^b ±5.69
ค่าสี					
L*	13.97 ^{ns} ±4.83	14.17 ^{ns} ±4.93	9.58 ^{ns} ±6.96	8.24 ^{ns} ±5.25	6.96 ^{ns} ±0.17
b*	-2.19 ^{ns} ±1.69	-1.49 ^{ns} ±1.80	-0.41 ^{ns} ±0.09	-0.36 ^{ns} ±0.53	-1.58 ^{ns} ±1.91

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ตาราง 3 สมบัติของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนเมื่อใช้กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับซอร์บิทอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 เป็นพลาสติกไฮเทรอร์
โดยนำน้ำหนักของพลาสติกมาโปรตีน

คุณสมบัติ	ซอร์บิทอล (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
ความหนา (ไมโครเมตร)	43.90 ^{ns} ±1.90	43.06 ^{ns} ±2.68	43.60 ^{ns} ±4.25	43.03 ^{ns} ±0.46
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	20.34 ^{ns} ±2.07	22.06 ^{ns} ±3.24	23.01 ^{ns} ±0.76	25.59 ^{ns} ±0.43
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.38 ^{ns} ±0.16	1.33 ^{ns} ±0.24	1.24 ^{ns} ±0.02	1.13 ^{ns} ±0.13
การต้านทานแรงดึงขาด ($\times 10^{-2}$ กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	24.45 ^a ±2.43	21.03 ^b ±0.41	18.55 ^{bc} ±2.22	16.84 ^c ±1.45
การยืดตัว (ร้อยละ)	70.09 ^b ±1.25	67.25 ^b ±8.33	71.84 ^b ±8.71	92.43 ^a ±1.36
การซึมผ่านไอน้ำ ($\times 10^{-4}$ กรัม/มิลลิเมตร(เมตร ² . ชั่วโมง กิโลปาสคาล)	4.30 ^a ±0.17	3.54 ^b ±0.13	3.77 ^b ±0.19	3.83 ^b ±0.16
การละลาย (ร้อยละ)	23.03 ^{ns} ±2.28	23.24 ^{ns} ±2.45	23.28 ^{ns} ±5.72	27.80 ^{ns} ±4.98
ค่าสี				
L*	10.05 ^a ±0.07	9.13 ^b ±0.28	8.84 ^b ±0.40	7.99 ^c ±0.05
B*	0.54 ^{ns} ±0.03	0.53 ^{ns} ±0.007	0.56 ^{ns} ±0.17	0.67 ^{ns} ±0.04

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตาราง 4 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ความชื้นเมื่อใช้กลีเซอรอลที่ความชื้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ความชื้นร้อยละ 10-30 เป็นพลาสติกไฮเซอริโดยนํานํ้าหนักของพลาสติกมาโปรตีน

คุณสมบัติ	พอลิเอทิลีนไกลคอล 400 (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
ความหนา (ไมโครเมตร)	43.90 ^{ns} ±1.90	43.90 ^{ns} ±1.90	45.56 ^{ns} ±0.98	47.21 ^{ns} ±1.26
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	20.34 ^{ns} ±2.07	33.99 ^{ns} ±0.71	31.92 ^{ns} ±9.93	30.27 ^{ns} ±11.0
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.38 ^{ns} ±0.16	1.62 ^{ns} ±0.21	1.68 ^{ns} ±0.11	1.62 ^{ns} ±0.04
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	24.45 ^a ±2.43	18.02 ^b ±1.20	14.91 ^c ±7.91	12.76 ^c ±0.57
การยืดตัว (ร้อยละ)	70.09 ^b ±1.25	96.01 ^a ±1.96	98.47 ^a ±3.34	99.19 ^a ±4.04
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻⁴ กรัม.มิลลิเมตร/เมตร ² .ชั่วโมง.กิโลปาสกาล)	4.30 ^a ±0.17	2.58 ^c ±0.06	2.95 ^b ±0.14	3.01 ^b ±0.22
การละลาย (ร้อยละ)	23.03 ^c ±2.28	25.30 ^{bc} ±0.74	26.43 ^{ab} ±0.99	29.13 ^a ±1.58
ค่าสี				
L*	10.05 ^{ns} ±0.07	9.54 ^{ns} ±0.31	9.50 ^{ns} ±1.38	9.13 ^{ns} ±1.30
b*	0.54 ^{ns} ±0.03	0.53 ^{ns} ±0.13	0.53 ^{ns} ±0.09	0.52 ^{ns} ±0.09

a-d ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ผลของชนิดและความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ต่อสมบัติของฟิล์มพลาสมาโปรตีน

สำหรับการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสมาโปรตีน โดยการเตรียมเป็นฟิล์มโปรตีน-พอลิแซคคาไรด์ งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม คือ ชนิดและความเข้มข้นของพอลิแซคคาไรด์ ชนิดของพอลิแซคคาไรด์ที่เลือกศึกษา 3 ชนิด คือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, เพคติน และคาราจีแนน โดยศึกษาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 (น้ำหนัก/น้ำหนักพลาสมาโปรตีน) และใช้พลาสติไซเซอร์เป็นกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/น้ำหนักพลาสมาโปรตีน) และตรวจวัดสมบัติของฟิล์มได้แก่ ความหนา ความโปร่งแสง การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว ความชื้น การซึมผ่านไอน้ำ การละลาย และค่าสีของฟิล์ม (L^* , b^* และ ΔE)

ผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

จากผลการทดลองในตาราง 5 พบว่าการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 2-8 ลงในฟิล์มพลาสมาโปรตีนมีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์ม ซึ่งจะทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) กับฟิล์มที่ไม่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ฟิล์มควบคุม) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จะทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่มีความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 จะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดมากกว่าฟิล์มควบคุมถึงร้อยละ 60.78 ($P < 0.05$) นอกจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะช่วยทำให้ฟิล์มพลาสมาโปรตีนมีความแข็งแรงมากขึ้นแล้ว ยังทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยฟิล์มโปรตีนที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) ของฟิล์มที่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในทุกความเข้มข้นกับฟิล์มควบคุม ทั้งนี้เนื่อง จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารประเภทเกลียวโซเดียมของคาร์บอกซีเมทิลอีเทอร์ซึ่งเป็นกัมธรรมชาติ (Diflis & Kiosseoglou, 2003) มีพอลิเมอร์กลูโคสเป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ beta -1,4 และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุที่แข็งแรงและมีผลต่อพฤติกรรมและการกระทำระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์ เมื่อให้ความร้อนทำให้เกิดเจลที่ข้นหนืดและคงตัว (Hercules Incorporate, 1999; Andrews, 1993) โดยเจลจะเข้าไปแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างช่องว่างของโมเลกุลตามโครงสร้างของสารละลายโปรตีน จึงทำให้น้ำฟิล์มมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์จะเชื่อมต่อกับโมเลกุลของโปรตีนด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalently) โดยยื่นเข้าไปด้านในเพื่อให้ประสานกันอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นที่

มากเกินพอของพอลิแซคคาไรด์จะไปลดการเคลื่อนย้ายและการงอได้ของโปรตีน จึงทำให้แนวโน้มการยืดตัวของฟิล์มมีค่าลดลง (Diftis & Kiosseoglou, 2003)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มพลาสมาโปรตีนให้ดีขึ้น กลับทำให้สมบัติการกีดกันความชื้นของฟิล์มพลาสมาโปรตีนลดลง โดยจะพบว่า การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 จะทำให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 50-65 ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เข้าไปแทรกในโครงสร้างของโปรตีน ส่งผลให้เกิดช่องว่างที่ทำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านได้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการละลายของฟิล์มที่พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 ฟิล์มมีการละลายเพิ่มขึ้นจากฟิล์มควบคุมถึงร้อยละ 21.91, 27.98, 42.21 และ 54.38 ตามลำดับ ($P < 0.05$)

นอกจากนั้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เนื้อฟิล์มจะมีความโปร่งแสงลดลงและมีสีเหลืองอ่อน ส่งผลให้สีของฟิล์มมีความแตกต่างจากฟิล์มควบคุม (ΔE) เพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ การเกิดเจลในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา Maillard reaction ของกรดอะมิโนของโปรตีน และหมู่รีดิวซ์ของน้ำตาลในสายพอลิแซคคาไรด์ (Scotter, 1993; Andrews, 1993)

ผลของเพคติน

ในทำนองเดียวกันกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพคตินมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มจากตาราง 6 พบว่าโดยเพคตินช่วยปรับปรุงการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มให้ดีขึ้น โดยฟิล์มโปรตีนที่เติมเพคตินที่ความเข้มข้นของร้อยละ 2 จะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดมากกว่าฟิล์มควบคุมถึงร้อยละ 45.84 ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเพคตินเป็นสารที่สามารถจับกับโปรตีนได้ด้วยพันธะโควาเลนต์ เมื่อให้ความร้อนจะละลายเป็นเจล และละลายได้ดีเมื่ออยู่ในตำแหน่ง electric equivalence point (Misha, Mann & Joshi, 2001) ส่งผลให้เนื้อฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายพลาสมาโปรตีนมากขึ้น นอกจากนั้นเพคตินยังช่วยให้ฟิล์มมีการยืดตัวมากขึ้น โดยเมื่อเติมเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะทำให้ฟิล์มมีค่าการยืดตัวมากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเพคตินซึ่งเป็นฟิล์มควบคุมเล็กน้อย แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) และการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินเป็นร้อยละ 6 และ 8 กลับทำให้การยืดตัวของฟิล์มลดลง โดยฟิล์มที่เติมเพคตินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 6 และ 8 มีการยืดตัวน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเพคติน (ฟิล์มควบคุม) ถึงร้อยละ 40 นอกจากนั้นการเติมเพคตินไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติการกีดกันความชื้นของฟิล์ม เมื่อใช้เพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 จะทำให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30.60-48.40 และ

เนื่องจากการรวมตัวและการละลายน้ำได้ดีของเพคติน ทำให้ฟิล์มที่เติมเพคตินจะละลายน้ำได้ดีกว่าฟิล์มควบคุม ($P < 0.05$) (Neirynck et al., 2004)

สำหรับสีของฟิล์มหลังจากผ่านการให้ความร้อนในระหว่างการขึ้นรูป เนื้อฟิล์มมีลักษณะสีเหลืองนูนออกน้ำตาล จึงทำให้ฟิล์มที่เติมเพคตินมีความโปร่งแสงลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินจะส่งผลให้ฟิล์มมีค่า b^* เพิ่มขึ้น คือฟิล์มมีสีเหลืองมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อให้ความร้อนสารละลายพลาสมาโปรตีนที่เติมเพคตินจะเกิดปฏิกิริยา Maillard reaction ของโปรตีน-เพคติน โดยส่วนใหญ่จะเกิดระหว่างโมเลกุลของโปรตีนกับโมเลกุลของเดกโตรส (dextrose) ของเพคติน โดยทั่วไปเพคตินที่มีจำหน่ายส่วนใหญ่จะมีเดกโตรส เป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 40

ผลของคาราจีแนน

จากตาราง 7 แสดงให้เห็นว่าคาราจีแนนมีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มพลาสมาโปรตีนเมื่อเติมคาราจีแนนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะทำให้ฟิล์มมีการต้านทานแรงดึงสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมคาราจีแนน (ฟิล์มควบคุม) ถึงร้อยละ 70.44 ($P < 0.05$) แต่กลับทำให้ฟิล์มมีค่าการยืดตัวลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของคาราจีแนน และมีค่าการยืดตัวต่ำกว่าฟิล์มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) คาราจีแนนที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 และ 8 ที่เป็นเช่นนี้เพราะคาราจีแนนซึ่งเป็นสารในกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ซัลเฟต จะเกิดเจลหลังจากให้ความร้อน จะให้โครงสร้างที่แข็งแรงและตายตัวไม่ยืดหยุ่น (Park et al., 1993) นอกจากนั้นการเกิดเจลของคาราจีแนนไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติการกักเก็บไอน้ำของฟิล์มที่เติมคาราจีแนนทุกระดับความเข้มข้น (2-8%) โดยมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มควบคุมถึงร้อยละ 46.97-56.58 สอดคล้องกับการละลายที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม

เนื่องจากฟิล์มมีความโปร่งแสงลดลงและมีสีน้ำตาลอ่อน จึงทำให้ฟิล์มที่เติมคาราจีแนนมีความสว่างไปในทางสีขาวยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความโปร่งแสงของฟิล์มลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาราจีแนน ซึ่งจะแตกต่างจากฟิล์มควบคุมที่มีความสว่างไปในทางสีเหลืองใสและมันวาว อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของสีไม่ทำให้ค่า b^* และ ΔE แตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ระหว่างฟิล์มที่เติมคาราจีแนนและฟิล์มควบคุม

ตาราง 5 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่ขึ้นรูปร่วมกับคาร์บอนที่เติมในฟิล์มพลาสติกที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยมีกัลทิออโรลดความเข้มชั้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นพลาสติกไฮดรอกซีไดนาไมท์ของพลาสติกไปรติน

คุณสมบัติ	คาร์บอนที่เติมในฟิล์มพลาสติก (ร้อยละ)						
	0	2	4	6	8		
ความหนา (ไมโครเมตร)	45.75 ¹⁰ ±2.28	44.17 ¹⁶ ±2.15	45.83 ¹⁶ ±2.45	46.58 ¹⁶ ±3.55	46.88 ¹⁶ ±2.75		
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	18.16 ¹⁵ ±0.97	15.33 ¹⁵ ±1.20	17.19 ¹⁵ ±1.55	18.39 ¹⁵ ±2.95	18.69 ¹⁶ ±3.42		
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.30 ⁵ ±0.15	1.64 ⁵ ±0.19	1.33 ⁵ ±0.11	1.84 ⁵ ±0.27	2.09 ⁵ ±0.21		
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	16.58 ⁴ ±2.22	21.68 ⁵ ±6.99	26.98 ⁵ ±2.59	25.36 ⁵ ±2.45	29.56 ⁵ ±2.04		
การยืดตัว (ร้อยละ)	121.9 ¹⁵ ±43.2	135.5 ¹⁵ ±26.2	130.1 ¹⁵ ±20.5	130.7 ¹⁵ ±37.6	129.8 ¹⁵ ±26.7		
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻¹ กรัม/มิลลิเมตร/เมตร ² ชั่วโมง/กิโลปาสคาล)	2.81 ⁵ ±0.16	4.22 ⁵ ±0.11	4.55 ⁵ ±0.35	4.57 ⁵ ±0.34	4.65 ⁵ ±0.19		
การละลาย (ร้อยละ)	18.48 ⁵ ±1.26	22.53 ⁵ ±1.80	23.65 ⁵ ±2.25	26.28 ⁵ ±3.59	28.53 ⁵ ±3.33		
ค่าสี							
L*	10.83 ¹⁵ ±1.10	11.31 ¹⁵ ±0.51	10.84 ¹⁵ ±0.43	10.31 ¹⁵ ±0.37	10.41 ¹⁵ ±0.48		
b*	1.14 ¹⁵ ±0.15	0.76 ¹⁵ ±1.17	0.59 ¹⁵ ±0.06	0.63 ¹⁵ ±1.67	-0.26 ¹⁵ ±0.51		
ΔE	-	5.34 ⁵ ±0.38	3.80 ⁵ ±0.06	9.18 ⁵ ±0.74	8.15 ⁵ ±1.62		

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ตาราง 6 สมบัติของฟิล์มพลาสติกไปรตันร่วมกับเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยมีลักษณะร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นพลาสติกใช้ชวยโดยนำน้ำหนักของพลาสติกไปรตัน

คุณสมบัติ	เพคติน (ร้อยละ)				
	0	2	4	6	8
ความหนา (ไมโครเมตร)	45.75 ^{ns} ±2.28	40.83 ^{ns} ±2.15	42.24 ^{ns} ±2.63	44.58 ^{ns} ±3.93	46.04 ^{ns} ±3.29
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	18.16 ^{ns} ±0.97	14.68 ^{ns} ±2.37	16.25 ^{ns} ±1.14	17.62 ^{ns} ±2.35	17.91 ^{ns} ±1.44
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ¹)	1.30 ^b ±0.15	1.39 ^b ±0.22	1.40 ^b ±0.17	1.41 ^b ±0.04	1.73 ^b ±0.22
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	16.58 ^c ±2.22	23.25 ^c ±0.59	20.70 ^b ±1.04	18.76 ^{bc} ±0.96	20.91 ^b ±2.10
การยืดตัว (ร้อยละ)	121.9 ^a ±43.2	137.2 ^a ±13.3	121.0 ^a ±13.2	72.74 ^b ±5.44	71.70 ^b ±10.9
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻⁴ กรัม.มิลลิเมตร/เมตร ² . ชั่วโมง. กิโลปาสกาล)	2.81 ^a ±0.16	3.67 ^a ±0.26	3.94 ^b ±0.47	4.04 ^b ±0.37	4.71 ^b ±0.35
การละลาย (ร้อยละ):	18.48 ^c ±1.26	22.54 ^{bc} ±1.97	23.77 ^{ab} ±2.47	25.16 ^{ab} ±4.43	26.92 ^a ±3.45
ค่าสี					
L*	10.83 ^{ns} ±1.10	10.85 ^{ns} ±0.18	10.19 ^{ns} ±0.46	9.84 ^{ns} ±0.43	9.80 ^{ns} ±2.21
b*	-0.24 ^c ±1.76	0.50 ^{bc} ±1.37	0.86 ^{ab} ±0.74	1.02 ^{ab} ±0.60	1.42 ^a ±0.50
ΔE	-	6.12 ^{ns} ±1.64	7.30 ^{ns} ±0.95	9.83 ^{ns} ±1.95	9.08 ^{ns} ±0.55

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ตาราง 7 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่เตรียมร่วมกับคาร์บอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยมีกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นพลาสติกที่เซอริโดยนำหน้าของพลาสติกมาไว้ที่หน้า

คุณสมบัติ	คาร์บอน (ร้อยละ)				
	0	2	4	6	8
ความหนา (ไมโครเมตร)	45.75 ^{ns} ±2.28	43.13 ^{ns} ±5.10	44.58 ^{ns} ±4.38	46.46 ^{ns} ±3.80	49.58 ^{ns} ±4.83
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	18.16 ^{ns} ±0.97	16.03 ^{ns} ±4.02	17.71 ^{ns} ±3.01	19.05 ^{ns} ±2.15	19.01 ^{ns} ±1.60
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.30 ^d ±0.15	1.43 ^d ±0.28	2.11 ^c ±0.26	2.77 ^b ±0.60	3.65 ^a ±0.62
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	16.58 ^c ±2.22	28.26 ^b ±2.34	21.21 ^b ±2.210	21.23 ^b ±2.59	24.35 ^b ±5.06
การยืดตัว (ร้อยละ)	121.9 ^a ±43.2	102.6 ^{ab} ±8.98	109.1 ^{ab} ±37.2	77.17 ^b ±13.6	73.79 ^b ±22.8
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻⁴ กรัม.มิลลิเมตร/เมตร ² .ชั่วโมง.กิโลปาสคาล)	2.81 ^a ±0.16	4.13 ^b ±0.51	4.18 ^b ±0.54	4.40 ^b ±0.65	4.21 ^b ±0.32
การละลาย (ร้อยละ)	18.48 ^b ±1.26	29.07 ^a ±4.94	31.86 ^a ±4.11	34.25 ^a ±3.45	35.03 ^a ±6.44
ค่าสี					
L*	10.83 ^c ±1.10	15.31 ^a ±0.31	15.21 ^a ±0.50	12.21 ^b ±0.87	11.31 ^{bc} ±0.46
b*	-0.24 ^{ns} ±1.76	0.27 ^{ns} ±4.70	0.62 ^{ns} ±0.10	0.81 ^{ns} ±0.005	1.29 ^{ns} ±0.35
ΔE	-	8.96 ^{ns} ±0.76	9.00 ^{ns} ±1.15	8.01 ^{ns} ±1.31	8.86 ^{ns} ±1.65

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแถวบน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ตัวอักษรตามแถวบน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ผลของชนิดและความเข้มข้นของลิปิดต่อสมบัติของฟิล์มพลาสมาโปรตีน

การเตรียมเป็นฟิล์มพลาสมาโปรตีน-ลิพิดอิมัลชัน ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม คือ ชนิดและความเข้มข้นของกรดไขมัน ชนิดของกรดไขมันที่ศึกษามี 2 ชนิด คือ กรดลอริก และทรีน 80 โดยศึกษาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 (น้ำหนัก/น้ำหนักพลาสมาโปรตีน) และมีพลาสตาไซเซอร์คือ กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/น้ำหนักพลาสมาโปรตีน) ตรวจวัดสมบัติของฟิล์ม ได้แก่ ความหนา ความโปร่งแสง การต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัว ความชื้น การซึมผ่านไอน้ำ การพองตัว การละลาย และสีของฟิล์ม (L^* , b^* และ ΔE)

ผลของกรดลอริก

การเติมกรดลอริกมีผลทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง ดังแสดงในตาราง 8 โดยเมื่อความเข้มข้นของกรดลอริกเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง ในขณะที่มีการยืดตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้กรดลอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 จะทำให้ฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่เติมกรดลอริก (ฟิล์มควบคุม) ถึงร้อยละ 27.54 และมีค่าการยืดตัวมากกว่าฟิล์มควบคุมถึงร้อยละ 50.03 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกรดลอริกไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์กับสารละลายพลาสมาโปรตีนหลังจากนำไปโฮโมจีไนส์ (homogenize) แต่กรดลอริกมีสมบัติเป็นสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรง ส่งผลให้ฟิล์มมีการต้านทานแรงดึงขาดที่ลดลง (Rhim et al., 1999)

การเติมกรดลอริกไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการกีดกันไอน้ำของฟิล์มพลาสมาโปรตีนได้ แต่จะช่วยปรับปรุงสมบัติการละลายของฟิล์มให้ดีขึ้น โดยเมื่อเติมกรดลอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 และ 8 จะลดการละลายได้ของฟิล์มลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม เนื่องจากสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของกรดไขมัน อย่างไรก็ตามการเติมกรดลอริกลงในฟิล์มพลาสมาโปรตีนทำให้น้ำฟิล์มมีสีขาวขุ่น ซึ่งฟิล์มมีความสว่าง (L^*) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม แต่ไม่มีความแตกต่างสถิติ ($P > 0.05$) ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา (2-8%)

ผลของทวิน 80

ในการทำงานเกี่ยวกับการเติมกรดลอริก การเติมทวิน 80 ลงไปในฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนมีผลทำให้ฟิล์มมีการยืดตัวเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติมทวิน 80 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 จะทำให้ฟิล์มมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 58.75-65.21 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากการเติมทวิน 80 ซึ่งเป็นลิปิดอิมัลชันที่อยู่ในกลุ่มสารซักฟอกชนิดหนึ่ง ทำให้เนื้อฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากด้านที่มีหัวของโมเลกุลโปรตีนจะจับกับด้านที่มีหัวของสารซักฟอก และหันด้านที่ไม่มีหัวอยู่ห่างออกไปอีกด้านหนึ่งของโมเลกุลโปรตีน การจับกันของสารซักฟอกกับโปรตีนและพลาสติกไฮเซอรที่แข็งแรง ส่งผลให้ฟิล์มมีการยืดตัวได้ดีขึ้น (Miranda et al., 2004) อย่างไรก็ตามถึงแม้ทวิน 80 จะช่วยปรับปรุงการยืดตัวของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนให้ดีขึ้น แต่ก็ทำให้ฟิล์มที่เติมทวิน 80 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 มีการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าในช่วงร้อยละ 10.99-39.57 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มควบคุม ($P < 0.05$)

ฟิล์มที่เติมทวิน 80 จะมีลักษณะสีเหลืองใสและมีความมันวาวเล็กน้อยบริเวณผิวหน้า ทำให้ฟิล์มมีความโปร่งแสงลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของทวิน 80 แต่ฟิล์มมีค่าสีไม่แตกต่างกันในทุกชุดการทดลอง

ตาราง 8 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่แปรผันร่วมกับการดลหรือที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยมีกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นพลาสติกที่เซออริโดยนำน้ำหนักของพลาสติกมาปรีคี่

คุณสมบัติ	การดลหรือ (ร้อยละ)				
	0	2	4	6	8
ความหนา (ไมโครเมตร)	46.46 ^{ns} ±2.81	49.29 ^{ns} ±1.23	50.33 ^{ns} ±1.23	51.54 ^{ns} ±1.92	52.50 ^{ns} ±1.72
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	25.40 ^a ±0.82	19.99 ^b ±0.91	19.93 ^b ±0.72	19.76 ^b ±0.73	19.73 ^b ±1.40
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.32 ^b ±0.20	2.79 ^a ±0.43	2.66 ^a ±0.36	2.72 ^a ±0.42	2.76 ^a ±0.21
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	15.32 ^b ±2.68	13.40 ^b ±0.05	11.23 ^c ±0.64	12.73 ^{bc} ±1.12	11.10 ^c ±0.07
การยืดตัว (ร้อยละ)	92.03 ^b ±26.2	118.0 ^{ab} ±20.8	124.1 ^{ab} ±16.7	142.6 ^a ±18.4	143.6 ^a ±48.0
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻⁴ กรัม/มิลลิเมตร/เมตร ² . ชั่วโมง/กิโลปาสกาล)	2.78 ^a ±0.11	3.79 ^b ±0.10	4.07 ^b ±0.17	4.14 ^a ±0.19	4.06 ^a ±0.18
การละลาย (ร้อยละ)	18.14 ^a ±1.23	19.21 ^a ±0.62	18.16 ^a ±1.25	16.14 ^b ±0.98	14.86 ^b ±0.90
ค่าสี					
L*	13.88 ^a ±0.82	11.66 ^b ±0.61	11.69 ^b ±0.43	11.52 ^b ±0.62	11.40 ^b ±0.18
b*	1.52 ^{ns} ±3.32	0.57 ^{ns} ±0.15	0.51 ^{ns} ±1.08	-0.27 ^{ns} ±0.07	0.44 ^{ns} ±0.01
ΔE	-	2.68 ^{ns} ±0.39	2.96 ^{ns} ±0.68	3.07 ^{ns} ±0.78	3.56 ^{ns} ±0.27

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
 ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ตาราง 9 สมบัติของฟิล์มพลาสติกที่เตรียมร่วมกับพรีน 80 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2-8 โดยมีกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 30 เป็นพลาสติกใสโดยนำน้ำหนักของพลาสติกมาปรีน

คุณสมบัติ	พรีน 80 (ร้อยละ)				
	0	2	4	6	8
ความหนา (ไมโครเมตร)	46.46 ^{ns} ±2.81	49.50 ^{ns} ±1.77	50.62 ^{ns} ±2.58	52.54 ^{ns} ±2.08	53.08 ^{ns} ±2.18
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	25.40 ^a ±0.82	19.87 ^b ±0.91	19.72 ^b ±1.46	19.34 ^b ±0.71	19.28 ^b ±0.78
ความโปร่งแสง (มิลลิเมตร ⁻¹)	1.32 ^b ±0.20	2.06 ^c ±0.33	2.10 ^c ±0.11	2.07 ^a ±0.18	2.07 ^a ±0.13
การต้านทานแรงดึงขาด (x10 ⁻² กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)	15.32 ^a ±2.68	8.06 ^b ±1.87	8.18 ^b ±2.45	6.11 ^b ±0.69	6.80 ^b ±1.35
การยืดตัว (ร้อยละ)	92.03 ^b ±26.2	146.1 ^a ±31.6	152.0 ^a ±51.2	151.3 ^a ±16.6	151.5 ^a ±20.3
การซึมผ่านไอน้ำ (x10 ⁻⁴ กรัม.มิลลิเมตร/เมตร ² .ชั่วโมง.กิโลปาสคาล)	2.78 ^c ±0.11	3.08 ^b ±0.28	3.37 ^b ±0.22	3.35 ^b ±0.18	3.88 ^a ±0.10
การละลาย (ร้อยละ)	18.14 ^{bc} ±1.23	20.78 ^a ±1.42	20.23 ^{ab} ±0.85	19.04 ^{abc} ±1.90	17.82 ^c ±1.03
ค่าสี					
L*	13.88 ^a ±0.82	15.15 ^a ±0.22	14.83 ^{ab} ±0.38	14.36 ^{ab} ±0.75	14.39 ^{ab} ±0.88
b*	1.52 ^{ns} ±3.33	-1.07 ^{ns} ±2.08	0.15 ^{ns} ±0.10	-0.08 ^{ns} ±0.74	0.26 ^{ns} ±1.50
ΔE	-	4.81 ^{ns} ±1.56	7.09 ^{ns} ±6.86	6.49 ^{ns} ±3.07	7.59 ^{ns} ±3.07

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
 ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพลาสติก

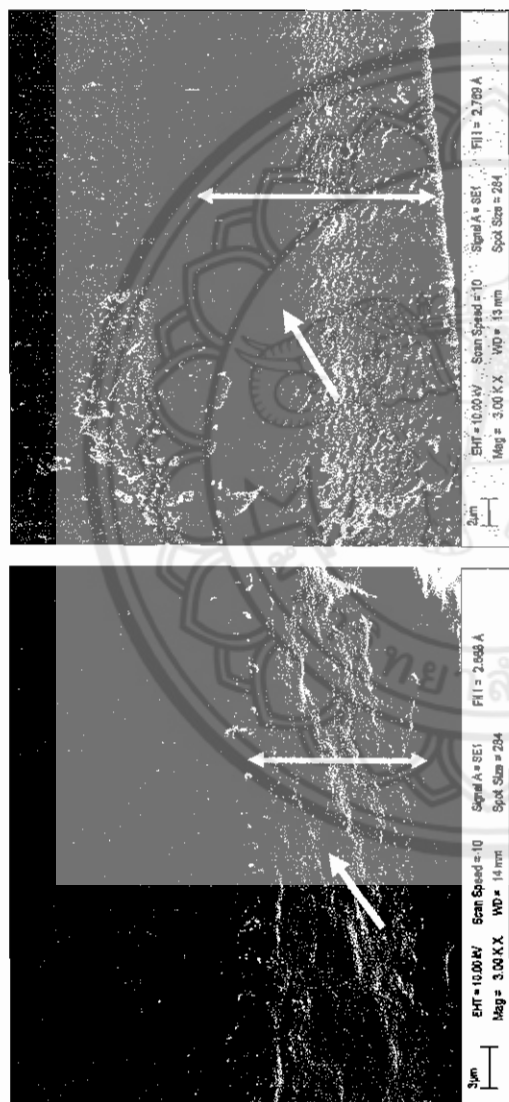
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพลาสติกโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยถ่ายเป็นภาพตัดขวางเอียงทำมุม 30 องศา (cross-section) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความพรุน (porous) ของโครงสร้าง ที่มาจากการจับกันของพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) กับพลาสติกไฮดรอกซ์ ที่สามารถผสมรวมกันได้ดีกับโครงสร้างของฟิล์ม (Zhang & Han, 2006a; Romero-Bastida et al., 2005) ภาพ 1a แสดงผลของพลาสติกไฮดรอกซ์ต่อโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพลาสติกที่การใช้กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยโมเลกุลของกลีเซอรอลจะเข้าไปแทรกจับกับโมเลกุลของโปรตีน ทำให้เนื้อฟิล์มมีลักษณะฟูออกมา การเติมกลีเซอรอลลงไปเป็นส่วนผสมในการผลิตฟิล์ม จะส่งผลให้น้ำถูกกักอยู่ในช่องเมทริกซ์ของฟิล์ม ก่อให้เกิดการขยายตัวและพองตัวของฟิล์ม เนื่องจากขนาดที่เหมาะสมและการละลายที่ดีของกลีเซอรอล ส่งผลให้ฟิล์มมีการยืดตัวได้ร้อยละ 70.09 และมีการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ $4.30 \text{ g.mm/m}^2.\text{hr.kPa}$ ในขณะที่เมื่อใช้กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 (ภาพ 1b) เนื้อฟิล์มมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากกว่าการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม สอดคล้องกับการยืดตัวที่เพิ่มขึ้นจากการใช้กลีเซอรอลเพียงชนิดเดียวถึงร้อยละ 25.92 และมีการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่ลดลงถึงร้อยละ 40.00

เมื่อนำฟิล์มพลาสติกมาปรับสมบัติโดยเติมเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 พบว่าฟิล์มที่เติมเพคติน จะมีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นมากกว่า (ภาพ 2b) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมเพคติน (ภาพ 2a) เนื่องจากการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี (Zhang & Han, 2006b) และคุณสมบัติในการเกิดเจลลาติโนเซชันของพอลิแซ็กคาไรด์ จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติกและพลาสติกไฮดรอกซ์ ส่งผลให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบและแข็งแรง (Mehyar & Han, 2004; Romero-Bastida et al., 2005) มากกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมเพคติน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้คือ ฟิล์มที่เติมเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเพคตินถึงร้อยละ 45.84

สำหรับฟิล์มพลาสติกที่เติมทวิน 80 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 จะมีเนื้อฟิล์มที่รวมตัวกันเป็นชั้นฟู และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบน้อยกว่าฟิล์มพลาสติกที่เติมเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 (ภาพ 2c) ฟิล์มจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมทวิน 80 ทั้งนี้เนื่องจากทวิน 80 เป็นลิปิดอิมัลชันที่อยู่ในกลุ่มสารซักฟอกชนิดหนึ่ง ทำให้ด้านที่มีหัวของโมเลกุลโปรตีนจับกับด้านที่มีหัวของสารซักฟอก และหันด้านที่ไม่มีหัวอยู่ห่างออกไปอีกด้านหนึ่ง

ของโมเลกุลโปรตีน ส่งผลให้การจับกันของโมเลกุลของฟิล์มอ่อนแอลง แต่ยืดหยุ่นได้ดีขึ้น (Miranda et al., 2004) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้คือ ฟิล์มมีการต้านทานแรงดึงขาด ลดลงร้อยละ 47.39 และมีการยืดตัวสูงขึ้นร้อยละ 65.16 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มฟิล์มที่ไม่ได้เติม ทวีน 80 ($P < 0.05$)

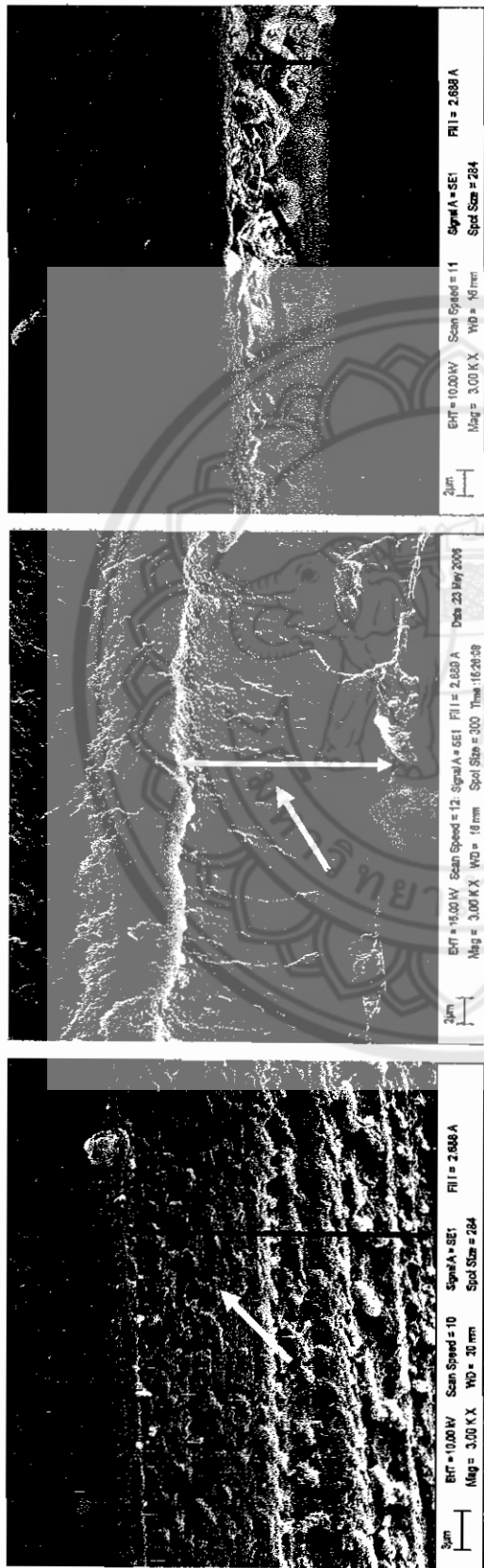




ภาพ 1 ผลของการใช้พลาสติกไซเบอร์ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน โดยถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

(a) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

โดยนำหน้า เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



(a)

(b)

(c)

ภาพ 2 ผลของการปรับปรุงฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน โดยการใช้เพคตินและทรีน 80 ต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน

โดยถ่ายแบบภาพตัดขวางเอียงทำมุม 30 องศา (a) ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่ใช้กัลิเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 ร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 400 ความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นพลาสติกไฮเซอร์ (b) ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมเพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (c) ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมทรีน 80 ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ระดับกำลังไฟ 10 และ 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ที่ กำลังขยาย 3,000 เท่า

การประยุกต์ใช้ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนในการเก็บรักษาขนมเค้ก

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนในการเก็บรักษาอาหาร พบว่า ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนมีการซึมผ่านไอน้ำสูง ทำให้ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีการระเหยน้ำสูง แต่คาดว่าจะใช้กับผลิตภัณฑ์แห้งหรือผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนในการห่อหุ้มขนมเค้ก และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5) เป็นเวลา 8 วัน โดยประกอบด้วย 5 ชุดการทดลอง ดังนี้

1. ขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้ม
2. ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์
3. ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน
4. ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมเพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2
5. ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมทวิน 80 ความเข้มข้นร้อยละ 2

ตรวจวัดความแข็ง การยอมรับทางประสาทสัมผัส และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของเค้กทุก 2 วัน พบว่า มีผลดังนี้

ความแข็งและลักษณะปรากฏของขนมเค้ก

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของขนมเค้กที่ผู้บริโภคต้องการคือ ความนุ่ม ในระหว่างการเก็บรักษา ความนุ่มของขนมเค้กจะลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงได้ด้วยค่าความแข็ง (hardness) ของเค้ก ซึ่งได้จากการวัดความแน่นเนื้อของเค้ก จากตาราง 10 พบว่าเมื่อเก็บรักษาขนมเค้กเป็นเวลา 8 วัน ขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนในทุกชุดการทดลองมีความแข็งของเนื้อสัมผัสน้อยกว่าขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้ม โดยขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนทั้ง 3 ชุดการทดลอง คือ ขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน ขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมเพคติน และขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมทวิน 80 สามารถลดความแข็งของขนมเค้กได้มากกว่าขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้มถึงร้อยละ 20.76, 26.22 และ 15.64 ตามลำดับ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่กีดกันการแพร่ผ่านของน้ำได้น้อยกว่าฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ จึงส่งผลให้เนื้อขนมเค้กแห้งและแข็งมากกว่าขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ในช่วง 6 วันแรกของการเก็บรักษา ($P < 0.05$) แต่เมื่อเก็บรักษาถึงวันที่ 8 จะไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ระหว่างขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนทั้ง 3 ชุดกับขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์

อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเก็บรักษาขนมเค้กเป็นเวลา 8 วัน ขนมเค้กที่ห่อหุ้มฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ เริ่มมีการเจริญเติบโตของเชื้อราขึ้นบนบริเวณผิวหน้า ในขณะที่ขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นทุกชุดการทดลองยังไม่พบเชื้อรา (ภาพ 3) ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่สามารถกีดกันน้ำและอากาศได้ดี ทำให้มีการระเหยน้ำได้ไม่ดี เนื้อขนมเค้กจึงนุ่มและชื้นมากกว่าขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้น จึงทำให้ขนมเค้กยังคงมีความชื้นสูง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้จากการทดลองนี้ยังพบว่าการใช้ฟิล์มพลาสติกไปรตี้นที่มีองค์ประกอบและสมบัติของฟิล์มที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชุดการทดลองในการห่อหุ้มขนมเค้ก ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของขนมเค้กในระหว่างการเก็บรักษา

การทดสอบทางประสาทสัมผัส

จากการสุ่มตัวอย่างและทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมเค้กทุกชุดการทดลอง ในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าผู้ทดสอบชิมขนมเค้กให้การยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นทั้ง 3 ชุดการทดลอง ไม่แตกต่างจากขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ ($P < 0.05$) และผู้ทดสอบยังให้การยอมรับโดยรวมมากกว่าขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้ม ทั้งนี้เนื่องจากการห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นที่มีสมบัติกีดกันการซึมผ่านไอน้ำได้ปานกลางและกีดกันการแพร่ผ่านอากาศได้ดี จึงทำให้ขนมเค้กมีกลิ่นและลักษณะปรากฏภายนอกที่ไม่แห้งและน่ารับประทานกว่าขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้ม และมีความแข็งของขนมเค้กน้อยกว่าขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้ม นอกจากนั้นการห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นไม่ส่งผลกระทบต่อการยอมรับผลิตภัณฑ์และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีผลิตภัณฑ์จากบรรจุภัณฑ์ที่นำมาห่อหุ้ม

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

เนื่องจากขนมเค้กเป็นแหล่งอาหารที่ดีของจุลินทรีย์ จึงเกิดการเน่าเสียได้ง่าย ดังนั้นในระหว่างการเก็บรักษาจะมีปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบคุณภาพทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์โดยการตรวจวัดปริมาณจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในตาราง 12 พบว่าขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในช่วง $3.08-4.10 \log \text{CFU/g}$ ซึ่งขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นที่เติมเพคตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่าขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นที่เติมทวิน 80 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 และขนมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้ม ($P < 0.05$) โดยฟิล์มพลาสติกไปรตี้นที่เติมเพคติน

มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่านมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้มและนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ 1.69 และ 1.21 log CFU/g ตามลำดับ

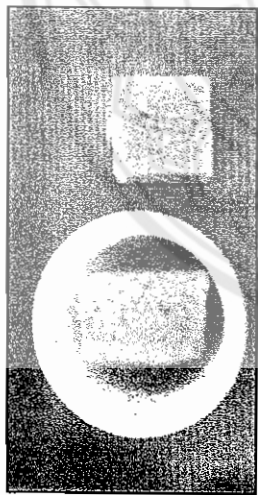
เมื่อตรวจวัดปริมาณยีสต์และราของนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนทั้ง 3 ชนิด พบว่านมเค้กที่มีปริมาณยีสต์และราใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง 0.57-0.73 log CFU/g โดยนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนมีปริมาณยีสต์และราน้อยกว่านมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้มและนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ 3.6 และ 2.26 log CFU/g ตามลำดับ ทั้งนี้ฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนไม่ได้มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยตรง แต่การที่ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราของนมเค้กที่เก็บไว้เป็นเวลา 6 วัน มีปริมาณน้อยกว่านมเค้กที่ไม่ได้ห่อหุ้มและนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ เนื่องจากฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนช่วยให้สภาวะภายในบรรจุภัณฑ์ของนมเค้กมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์น้อยกว่า จึงช่วยยืดระยะเวลาการเก็บรักษา ในขณะที่ฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์มีความสามารถในการกักกันการซึมผ่านไอน้ำได้ดี จึงทำให้สภาวะของนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์มีความชื้นสูงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ดังจะเห็นการเสื่อมเสียบริเวณผิวหน้า (decay incidence) ของนมเค้กได้อย่างชัดเจนในวันที่ 8 ของการเก็บรักษา

ตาราง 10 ความแข็งแรงของขนนกที่หักหักด้วยฟิล์มชนิดต่าง ๆ ทำการตรวจวัดทุก 2 วัน ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5) เป็นเวลา 8 วัน

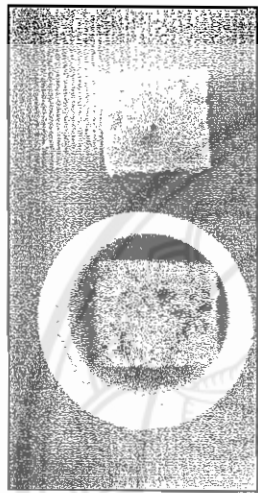
ชนิดฟิล์ม	ความแข็งแรงของขนนก ($\times 10^{-2}$ กิโลกรัม/มิลลิเมตร ²)				
	วันที่ 0	วันที่ 2	วันที่ 4	วันที่ 6	วันที่ 8
- ขนนกหักด้วยฟิล์มที่ไม่ได้ห่อหุ้ม	29.53 ^{ns} ± 1.09	34.26 ^a ± 2.36	41.94 ^a ± 3.17	49.33 ^a ± 3.69	82.55 ^a ± 5.07
- ขนนกหักด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์	29.19 ^{ns} ± 1.68	29.53 ^b ± 2.45	31.36 ^d ± 1.67	32.88 ^e ± 1.73	65.43 ^b ± 0.67
- ขนนกหักด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน	27.18 ^{ns} ± 1.68	33.89 ^a ± 1.28	36.06 ^{bc} ± 1.15	39.09 ^b ± 2.08	68.46 ^b ± 1.09
- ขนนกหักด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติม เพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2	27.85 ^{ns} ± 2.97	32.89 ^a ± 0.77	35.23 ^c ± 2.01	39.08 ^b ± 1.13	66.11 ^b ± 1.28
- ขนนกหักด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติม ทรีวัน 80 ความเข้มข้นร้อยละ 2	27.52 ^{ns} ± 1.34	34.48 ^a ± 1.67	38.92 ^{ab} ± 1.89	41.61 ^b ± 1.09	67.45 ^b ± 1.29

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$)



(a) ขนเมเค้กชุดควบคุมที่ไม่ได้ห่อหุ้ม



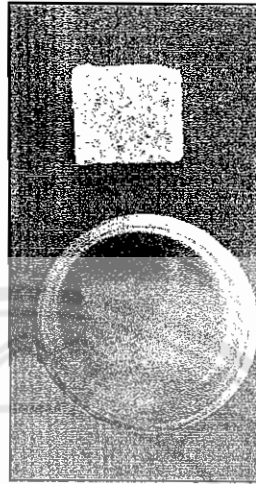
(b) ขนเมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์



(c) ขนเมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน



(d) ขนเมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน
ที่เติมเพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2



(e) ขนเมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน
ที่เติมพวีน 80 ความเข้มข้นร้อยละ 2

ภาพ 3 ลักษณะปรากฏของขนเมเค้กเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5)

ตาราง 11 การทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มชนิดต่าง ๆ ทำการตรวจวัดในวันที่ 6 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60±5)

ชนิดฟิล์ม	การยอมรับลักษณะทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏ	ลักษณะเนื้อสัมผัส	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
- ขนมเค้กชุดควบคุมที่ไม่ได้ห่อหุ้ม	6.20 ^{ns} ±1.98	6.10 ^{ns} ±1.59	6.10 ^{ns} ±1.57	6.70 ^{ns} ±0.67	6.50 ^{ns} ±1.26	6.30 ^{ns} ±1.33
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์	7.10 ^{ns} ±1.59	5.90 ^{ns} ±1.85	6.70 ^{ns} ±1.33	7.00 ^{ns} ±1.05	6.50 ^{ns} ±1.17	7.10 ^{ns} ±1.10
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสมาโปรตีน	6.60 ^{ns} ±1.71	6.70 ^{ns} ±0.67	7.10 ^{ns} ±0.99	7.01 ^{ns} ±0.87	6.50 ^{ns} ±0.97	7.10 ^{ns} ±0.87
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสมาโปรตีนที่เติมเพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2	7.20 ^{ns} ±1.03	6.70 ^{ns} ±1.56	7.30 ^{ns} ±1.15	7.00 ^{ns} ±1.24	6.70 ^{ns} ±1.25	7.00 ^{ns} ±0.81
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสมาโปรตีนที่เติมทวิน 80 ความเข้มข้นร้อยละ 2	7.00 ^{ns} ±1.24	6.90 ^{ns} ±1.19	7.40 ^{ns} ±1.17	7.30 ^{ns} ±0.94	6.60 ^{ns} ±1.50	6.90 ^{ns} ±1.52

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05)

ตาราง 12 ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (พวก mesophile) และ ปริมาณยีสต์และราของขนมเค้กที่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มชนิดต่าง ๆ ทำการตรวจวัดในวันที่ 6 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5)

ชนิดฟิล์ม	ปริมาณจุลินทรีย์ (log CFU/g)	
	จุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์และรา
- ขนมเค้กชุดควบคุมที่ไม่ได้ห่อหุ้ม	$4.77^a \pm 0.08$	$4.17^a \pm 0.04$
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์	$4.29^b \pm 0.06$	$2.83^b \pm 0.01$
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีน	$4.10^c \pm 0.07$	$0.57^b \pm 0.98$
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมเพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2	$3.08^d \pm 0.03$	$0.57^b \pm 0.98$
- ขนมเค้กห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกมาโปรตีนที่เติมทวิน 80 ความเข้มข้นร้อยละ 2	$3.30^d \pm 0.02$	$0.73^b \pm 1.25$

a-d ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)
 ns ตัวอักษรตามแนวนอน แสดงถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$)