

รายงานผลงานเรื่องเติมการทดลองที่สิ้นสุด

1. ขุดโครงการวิจัย : วิจัยและพัฒนาการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์
2. โครงการวิจัย : วิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์
กิจกรรม : การวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากผลิตภัณฑ์
กิจกรรมย่อย (ถ้ามี) : -
3. ชื่อการทดลอง (ภาษาไทย) : วิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ชีวภาพสำหรับอาหาร
ชื่อการทดลอง (ภาษาอังกฤษ) : Research and Development biopackaging for food
4. คณะผู้ดำเนินงาน
หัวหน้าการทดลอง : นางสาวนภัสร เลียบวัน สังกัด กวป.
ผู้ร่วมงาน : นางสาวจรรวรณ์ รัตนสกุลธรรม สังกัด กวป.
นางสาวศิริพร เติ่งรัง สังกัด กวป.
5. บทคัดย่อ :

ผลิตภัณฑ์อาหาร ผักและผลไม้ มีองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ เพคตินและเซลลูโลสทำให้สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มและใช้เป็นวัสดุสำหรับขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ชีวภาพได้ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมและพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ ทำการทดลองที่กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตภัณฑ์ระหว่างปี 2556-2558 โดยแปรรูปผักและผลไม้ที่คัดเลือกให้อยู่ในเนื้อมะละเอียด นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีและขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และทดสอบคุณสมบัติ พบว่าแครอทซึ่งมีองค์ประกอบของเพคตินสูงที่สุด สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดีที่สุด ปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มโดยการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ เพคตินและแอลจินตที่ 1.5, 3 และ 4.5% โดยน้ำหนักแครอท พบว่าไฮโดรคอลลอยด์ส่งผลให้ฟิล์มมีความหนา ค่า L^* ความต้านทานต่อแรงดึงขาดและความต้านทานไอน้ำเพิ่มขึ้น (WVTR ลดลง) ($P < 0.05$) ขณะที่ความต้านทานก๊าซออกซิเจนลดลง (OTR เพิ่มขึ้น) แต่ไม่มีผลต่อการยึดตัวของฟิล์ม ($P \geq 0.05$) โดยการเติมแอลจินตที่ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักแครอทให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติดีที่สุด ดังนั้นจึงปรับปรุงความยืดหยุ่นของฟิล์มโดยเติมโซลิทอลที่ 1.25, 2.5, 3.75, 5 และ 6.25 % โดยน้ำหนักแครอท พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซลิทอลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนา การละลายน้ำ ความชื้นและการยึดตัวของฟิล์มเพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) แต่ส่งผลให้ฟิล์มมีความต้านทานต่อแรงดึงขาด ค่า L^* ความต้านทานไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลง ($P < 0.05$) โดยเมื่อระดับโซลิทอลสูงขึ้นส่งผลให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสีเร็วขึ้นในระหว่างการเก็บ โดยเลือกฟิล์มที่เติมแอลจินต 3% และ

ไซลิทอล 3.75% ของแครอทเป็นฟิล์มห่อผลิตภัณฑ์ ทดสอบกับลูกอมถั่วกะทิ โดยพบว่าลูกอมที่ห่อด้วยฟิล์มแครอทเกิดการหืนช้ากว่าลูกอมที่ไม่ห่อ และลูกอมห่อด้วยกระดาษไข

Agriculture such as fruit and vegetable pulp have been studied as potential film forming materials to be used as food biopackaging because of their chemical composition of polysaccharide such as pectin and cellulosic substance. This research aims to select potential fruits and vegetables and develop to biomaterial for food packaging. The research was processed at Postharvest and Processing Research and Development Division during 2013-2015. Selected fruits and vegetables were processed to puree and used them as raw materials for film processing. Chemical compositions and film properties were determination. Among the purees, carrot showed the highest pectin, could produce the best film. The film's properties was Improved by adding hydrocolloids, pectin and alginate at 1.5, 3 and 4.5% w/w of puree. The results showed that increasing concentration of both hydrocolloids were increased thickness, L^* , tensile strength and water barrier (WVTR decreased) of film ($P < 0.05$) while oxygen barrier of film were reduced (OTR increased). Film containing 3% Alginate had better properties than other films. However, both of hydrocolloids could not improve elongation of films. So, xylitol at 1.25, 2.5, 3.75, 5 and 6.25% w/w of carrot puree were added to increased film's elongation. The results showed increasing concentration of xylitol that increased thickness, water solubility, moisture content and elongation of film ($P < 0.05$). On the other hands, tensile strength, water vapor barrier, L^* and oxygen barrier of film were reduced ($P < 0.05$). The higher levels xylitol caused the increased discolored of carrot film between storage. Afterward, carrot with 3% alginate and 3.75% xylitol was selected to form peanut toffee wrapper. During 4 weeks at 65% RH, peanut toffee which wrapped with carrot based film was slower rancidity than wrapped with wax paper and unwrapped.

6. คำนำ :

บรรจุภัณฑ์อาหารมีหน้าที่ปกป้อง ค้ำครองอาหารจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ช่วยยืดอายุการเก็บอาหาร และป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์และทางเคมี จากการสำรวจส่วนแบ่งตลาดของวัสดุบรรจุในปี 2012 พบว่าบรรจุภัณฑ์อาหารมากกว่า 30% เป็นพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งย่อยสลายได้ยากและก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม (Tharanathan, 2003) ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ (Biopackaging) ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ออกมาในหลายรูปแบบ รวมถึงในรูปของฟิล์มและสาร

เคลือบบริโภคนได้ (edible film and coating) เพื่อนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Karina *et al.*, 1999) โดยพิจารณาจากคุณสมบัติ ความสามารถในการกั้นการผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน การเกิดออกซิเดชันของไขมัน และการสูญเสียกลิ่นและรสชาติ (Kester and Fennema, 1986) คุณสมบัติเชิงหน้าที่เหล่านี้มาจากส่วนประกอบหลักของฟิล์มบริโภคนได้ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (สตาร์ช เพคติน แอลจิเนต อนุพันธ์เซลลูโลส) โปรตีน และลิพิด ซึ่งอาจใช้เป็นวัตถุดิบชนิดเดียวหรือผสมกัน

เนื้อผักและผลไม้ เช่น แครอท มะเขือเทศ แอปเปิ้ล มีองค์ประกอบของเพคติน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่เรียกว่า ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) มีคุณสมบัติการกระจายในน้ำดี และสามารถเกิดฟิล์มได้ (นิธิยา, 2553) ทำให้เนื้อของผักและผลไม้เหล่านี้สามารถตีปั่นได้เป็นเนื้อละเอียด (Puree) และมีความข้นหนืด นอกจากนี้เนื้อผักและผลไม้ยังมีเส้นใยซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของเนื้อฟิล์ม และสารสำคัญ เช่น วิตามิน เบต้าแคโรทีน และสารประกอบฟีนอลซึ่งมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ จึงเป็นอีกวัตถุดิบอีกชนิดได้รับความสนใจนำมาผลิตเป็นฟิล์มบริโภคนได้ อย่างไรก็ตามฟิล์มจากเนื้อผักและผลไม้เหล่านี้ยังคุณสมบัติหลายประการด้อยกว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นๆ เช่น ความแข็งแรงเชิงกล และการกั้นผ่านมวลสาร โดยจากการศึกษาของ McHugh *et al.*, (1996) พบว่าเนื้อของพืช แอปเปิ้ล แอปริคอต และลูกแพร์ มีคุณสมบัติที่สามารถขึ้นรูปฟิล์มที่ได้ โดยมีคุณสมบัติกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ดี แต่กั้นการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ จึงมีการนำสารเติมแต่งชนิดต่างๆ มาปรับปรุงคุณสมบัติให้กับฟิล์ม ทั้งสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ เช่น เพคติน (อรัญญา, 2007) แอลจิเนต (Rojas *et al.*, 2007, Azedo *et al.*, 2011) และ อนุพันธ์เซลลูโลส (Wang, 2011) เป็นต้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และ ไซลิทอล เป็นต้น เพื่อปรับปรุงการยึดตัวของฟิล์ม (Yoo and Krochta, 2012) และไขมันที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น น้ำมันพืช กรดโอเลอิก เป็นต้น เพื่อเพิ่มความต้านทานการผ่านของไอน้ำ (McHugh and Senesi, 2000) เป็นต้น

เพคติน เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของพอลิแซ็กคาไรด์พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืช โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ พบในผักและผลไม้ดิบ เปลือกผลไม้วงศ์ส้ม เช่น ส้มเขียวหวาน ส้มโอ มะนาว มีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิก (D-galacturonic acid) ที่ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β -(1 $\rightarrow$ 4) โดยหมู่คาร์บอกซิล ในโมเลกุลของกรดกาแลคทูโรนิกบางส่วนจะถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยหมู่เมทิลได้เป็นเมทอกซิลเอสเทอร์ซึ่งเป็นตัวแบ่งชนิดและสมบัติของเพคติน โดยเพคตินที่มีหมู่เมทอกซิลมาก เรียกว่า high-methoxyl pectin หรือ HM-pectin จะมีระดับของเมทอกซิเลชัน (degree of methoxylation) มากกว่า 50% จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง จะสามารถเกิดเจลได้ดีที่ pH 2.0-3.5 และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 65-70% ขณะที่เพคตินที่มีค่า degree of methoxylation น้อยกว่า 50 หรือ Low-methoxyl pectin (LM-Pectin) จะมีกลไกการเกิดเจลจากการเชื่อมข้าม (cross-link) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและกับแคลเซียม สามารถเกิดเจลได้ดีในช่วง pH 2.5-5.5 (นิธิยา, 2553)

แอลจิเนต เป็นสารสกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) เป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดสายตรงของกรดแมนูโรนิกและกรดกลูโรนิก ผลิตทั้งในรูปอนุพันธ์ของเกลือโซเดียม โพแทสเซียม แอมโมเนียม เป็นต้น แอลจิเนตจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (นิธิยา, 2553) จากการศึกษากการเกิดเจ

ลของแอลจินเตของ Mancini and McHugh (2000) พบว่าแอลจินเตสามารถเกิดเจลได้โดยอาศัยผลไม้ที่มีความเข้มข้นสูง (26-37%) ซึ่งเป็นผลจากการเชื่อมพันธะระหว่าง HM-Pectin กับ กรดกลูโคนิกของแอลจินเต สารกลุ่มพอลิออล (polyols) เป็นสารให้ความหวานแต่พลังงานต่ำ (Yadav *et al.*, 2014) ถูกนำมาใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อลดความกรอบเปราะ (brittleness) ให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยจะเข้าไปแทรกตัว รบกวนพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ เกิดเป็นช่องว่าง (free volume) ภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น จึงยืดหยุ่นมากขึ้น (Sothornvit and Krochta, 2000) พอลิออลที่นิยมนำมาเป็นพลาสติกไซเซอร์มากที่สุด คือ กลีเซอรอล เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เข้าไปแทรกและกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี อย่างไรก็ตามเนื่องจากกลีเซอรอลทำให้เกิดการเคลื่อนที่สู่ผิวฟิล์มระหว่างเก็บได้รวดเร็ว Tong *et al.* (2013) ได้ศึกษาผลของพอลิออล 4 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล ไซลิทอล และฟรุคโตส ในการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของฟิล์มผสมโพลูลาน แอลจินเตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าไซลิทอลสามารถเพิ่มการยืดตัวของฟิล์มได้รองจากกลีเซอรอล นอกจากนี้ไซลิทอลยังให้พลังงานต่ำกว่ากลีเซอรอลและให้ความหวานได้เทียบเท่าน้ำตาลซูโครส จึงมีความน่าสนใจนำมาใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับฟิล์มจากผักและผลไม้ (พิมพ์เพ็ญ และ นิธิยา, <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1628/sugar-alcohol>)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของเนื้อผักและผลไม้ที่เหมาะสมในการผลิตเป็นฟิล์มบริโภคได้และการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มด้วยไฮโดรคอลลอยด์ และไซลิทอลในปริมาณต่างๆ เพื่อให้สามารถพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้

7. วิธีดำเนินการ :

อุปกรณ์

- ผลผลิตผลเกษตร ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วขาว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วแดง ถั่วเขียว และมะเขือเทศ จากตลาดไท
- เพคตินชนิดเมทอกซิลสูง (High Methoxyl Pectin, Food Grade, เคมีภัณฑ์)
- โซเดียมแอลจินเต (Sodium Alginate, Food Grade, รวมเคมี)
- ไซลิทอล (Xylitol, Food Grade, รวมเคมี)
- ลูกอมถั่วกะทิ
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH Trolox
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณเพคติน ได้แก่ กรดแอสติค ()
- โถดูดความชื้น (Desicator)
- แผ่นอะคริลิกสำหรับขึ้นรูป (ขนาด 30×30×0.4 เซนติเมตร)
- ถ้วยอลูมิเนียม (Aluminium can)
- เครื่อง Universal Testing Machine; Instron
- เครื่อง UV Spectrophotometer
- เครื่องวัดความหนา (Dial Thickness Gauge, MOORE & WEIRHT)

- เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Multistirrer, SBSA-08 Series B)
- เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Daiichi, Model:TH-303C)
- เครื่องวัดสี (Konica Minolta Chroma meter, Model: CR-400)
- เครื่องปั่นผสมอาหารเนกประสงค์ (Phillip)
- ตู้อบร้อน (Binder)
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Mettler RM480 DeltaRange)
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler AE200)

วิธีการ

1. คัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปเป็นฟิล์มชีวภาพ

นำผลิตภัณฑ์เกษตร ล้างน้ำสะอาด ปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก นึ่งประมาณ 20 นาทีหรือจนกว่าเนื้อนุ่ม นำไปบดละเอียด

1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์

1.1.1 ความเป็นกรดเบส

1.1.2 ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC (1990)

1.1.3 ปริมาณเพคติน ในรูปแคลเซียมเพคเตท ตามวิธีของ Ruck (1995)

ชั่งตัวอย่าง 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยค่อยเติมน้ำกลั่นทดแทนส่วยที่ระเหย จากนั้นปรับปริมาณเป็น 500 มิลลิลิตร แล้วกรองแยกส่วนใส่ออกมา

นำตัวอย่างใส 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มัล 10 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้น เติมสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 นอร์มัล 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล 25 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มนาน 1 นาที กรองขณะร้อน ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน จนกว่าสารละลายใสไม่เกิดตะกอนขาวเมื่อไทเทรตกับสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 1%

หาน้ำหนักของตะกอนเพคตินที่กรองได้ โดยอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสด้วยตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักหลังอบ นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์แคลเซียมเพคเตทต่อน้ำหนักแห้งตัวอย่าง (จากข้อ 1.2.2) ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์แคลเซียมเพคเตท} = \frac{\text{น้ำหนักแคลเซียมเพคเตท}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \times 100$$

1.1.4 ปริมาณเยื่อใย (Crude fiber) ตามวิธี AOAC (1990)

1.2 ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากผลิตผลเกษตร ดัดแปลงจาก McHugh (1996)

เตรียมวัตถุดิบที่ความเข้มข้น 20-40% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมน้ำจนมีปริมาตรรวม 200 มิลลิลิตร กวนด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 20 นาที หรือจนกว่าจะเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบนแผ่นอะคริลิกขนาด 30 x 30 เซนติเมตรหนา 4 เซนติเมตร อบแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 65 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วลอกแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นอะคริลิก เปรียบเทียบความสามารถในการลอกออก โดยเลือกความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดของแต่ละชนิดผลิตผลที่สามารถลอกออกได้

1.3 ทดสอบคุณสมบัติ

เตรียมฟิล์มตามความเข้มข้นที่ได้จากข้อ 1.3 เก็บฟิล์มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปมาทดสอบคุณสมบัติ ดังนี้

1.3.1 ความหนา (Thickness) วัดด้วยเครื่องวัดความหนา

1.3.2 ค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity a_w)

1.3.3 ความชื้น ดัดแปลงจาก AOAC (1990)

อบถั่วอัลมอนด์ที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนอย่างละเอียด 0.0001 กรัม ชั่งฟิล์ม 1.5 กรัม บันทึกน้ำหนัก (A_0) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังอบ บันทึกน้ำหนัก (A_1) คำนวณค่าความชื้นของตัวอย่าง

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

1.4 คัดเลือกผลิตผลที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ศึกษาในขั้นต่อไป

2. ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติของฟิล์ม

เตรียมผลิตผลคัดเลือกตามข้อ 1 นำผลิตผล 60 กรัม เติมน้ำจนมีปริมาตรรวม 200 มิลลิลิตร ขึ้นรูปตามกรรมวิธีข้อ 1.2 นำมาทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่

2.1 ความหนา (Thickness)

2.2 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

2.3 ปริมาณความชื้น ดัดแปลงจาก AOAC (1990) (ตามข้อ 1.1.3)

2.4 ค่าสี ระบบ CIE Lab ($L^*a^*b^*$) โดยเครื่อง Konica Minolta Chroma meter, Model: CR-400

2.5 ความต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength) และการยืดตัว (Elongation) ตาม ASTM D882-10

ตัดตัวอย่างขนาด 25x100 มิลลิเมตร ตัวอย่างละ 8 ซ้ำ ปรับสภาวะที่ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำมาทดสอบ ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine; Instron ระยะห่างระหว่างปากจับ 100 มิลลิเมตร ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตร/นาที

2.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate, WVTR)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E96-00 Water Vapor Transmission of Materials สภาวะในการทดสอบ คืออุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90% โดยศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

2.7 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate, OTR)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3985-05 Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor สภาวะในการทดสอบ คืออุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 0% ด้วยเครื่อง Oxygen Permeation Tester; Illinois 8000 โดยศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

2.8 เลือกกรรมวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ศึกษาในขั้นต่อไป

3. ศึกษาปริมาณโซลิตอลที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม

วางแผนการทดลองแบบ RCB 4 ซ้ำ 6 กรรมวิธี ได้แก่ ฟิล์มจากข้อ 2 ไม่เติมโซลิตอลเป็นชุดควบคุม และ ฟิล์มเติมโซลิตอล 1.25% 2.5% 3.75% 5.0% และ 6.25% โดยน้ำหนักผลิตผลตามลำดับ เติมน้ำจันมีปริมาตรรวม 200 มิลลิลิตร ขึ้นรูปตามกรรมวิธีข้อ 1.2 นำมาทดสอบคุณสมบัติ

3.1 ทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม ความชื้น a_w ความชื้น ค่าสี ความต้านทานต่อแรงดึงขาด และการยืดตัว อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ตามข้อ 2.3

3.2 การละลายน้ำ (Water solubility) ตามวิธีของ Su, J., *et al.* (2010) และ Tongdeesoontorn *et al.* (2011) ดังนี้

ตัดแผ่นฟิล์มขนาด 50x50 มิลลิเมตร หรือน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม ตัวอย่างละ 3 ชิ้น อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักก่อนการละลาย (W_0) แฉในบีกเกอร์ที่มีน้ำปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยพาราฟิล์ม วางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 (กระดาษกรองที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง) นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักหลังการละลาย (W_1) นำไปคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำ ดังนี้

$$\% \text{ Solubility} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100$$

- 3.3 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มระหว่างการเก็บ ทุก 10 วัน เป็นระยะเวลา 50 วัน เทียบกับวันที่ 0 นำมาคำนวณหาค่าความแตกต่างของสี (Total Color Different, ΔE) ตามสูตร

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

- 3.4 เลือกกรรมวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ศึกษาในขั้นต่อไป

4. ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

- 4.1 ทดสอบคุณภาพและความปลอดภัยของการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

- 4.1.1 ตรวจเชื้อจุลินทรีย์ โดยบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
- 4.1.2 วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ โดยบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
- 4.1.3 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ตามวิธีของ Li *et al.* (2015)

โดยคำนวณปริมาณการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เป็น ไมโครโมลโทรลอกซ์ ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง ($\mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$) โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานโทรลอกซ์ ความเข้มข้น 0-250 ไมโครโมลาร์

- 4.2 ศึกษาการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ลูกอมกะทิ

เลือกฟิล์ม ขนาด 7×10 เซนติเมตร ห่อลูกอมถั่วกะทิ เก็บตัวอย่างที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 นำมาทดสอบคุณภาพดังนี้

- 4.2.1 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)
- 4.2.2 ค่าเปอร์ออกไซด์ ดัดแปลงจาก AOAC (1990) และ AOCS (1997)

ซึ่งตัวอย่าง 3 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำสารละลายผสมกรดอะซิติกและคลอโรฟอร์ม 30 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที กรองด้วย Whatman เบอร์ 4 ภายใต้สภาวะสุญญากาศ นำสารละลายที่ได้เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์อิ่มตัว 1 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 5 นาที นำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.01 นอร์มัลจนเป็นสีเหลืองอ่อน หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นล้าง 1% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ไทเทรตต่อจนกระทั่งสีน้ำเงินหายไป

5. คำนวณต้นทุนการผลิตแผ่นฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลัง

คำนวณต้นทุนการผลิตฟิล์ม และต้นทุนต่อชิ้นบรรจุภัณฑ์

ระยะเวลา ตุลาคม 2555 – กันยายน 2558

สถานที่ดำเนินการ กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลการเกษตร

8. ผลการทดลองและวิจารณ์

1. คัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปเป็นฟิล์มชีวภาพ

1.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์เภสัชภัณฑ์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ เพคติน เซลลูโลส สตาร์ช ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพทำให้สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ โดยเพคตินเป็นส่วนที่เชื่อมเนื้อเยื่อของเซลล์เข้าด้วยกันส่งผลต่อความยืดหยุ่นและบั่นเนื้อเดียวกันเมื่อนำไปขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพ ขณะที่เส้นใย (Crude fiber) เป็นส่วนของเซลลูโลสที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืช ทำให้ฟิล์มมีความคงตัวมากขึ้น (จริงแท้, 2539) จากการศึกษาเนื้อผักและผลไม้ (puree) 5 ชนิดพบว่ามียังมีองค์ประกอบเคมีแตกต่างกัน ดังแสดงใน ตารางที่ 1 โดยแครอทมีปริมาณเพคตินสูงสุดคือ 6.58 ± 0.10 % ของน้ำหนักแห้ง รองลงมาคือ กะหล่ำปลีแดง และมะม่วง 6.44 ± 0.38 และ 5.51 ± 0.37 % ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ขณะที่กะหล่ำปลีแดงมีปริมาณเส้นใยสูงที่สุด คือ 13.6 ± 3.61 % ของน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของผลิตภัณฑ์เภสัช

Sample	Chemical Properties			
	pH	Dry matter	Pectin	Crude fiber
		(%)	(% dry wt.)	(%dry wt.)
Banana	6.24 ± 0.06	33.13 ± 0.21	3.68 ± 0.27	2.69 ± 0.45
Carrot	7.62 ± 0.12	10.75 ± 0.08	6.58 ± 0.10	8.33 ± 0.92
Mango	3.43 ± 0.07	10.80 ± 0.22	5.51 ± 0.37	8.02 ± 6.06
Red Cabbage	5.87 ± 0.10	7.44 ± 0.08	6.44 ± 0.38	13.6 ± 3.61
Tomato	4.44 ± 0.15	5.51 ± 0.29	4.33 ± 0.27	5.70 ± 1.32

1.2 ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากผลิตภัณฑ์เภสัช

จากการทดสอบขึ้นรูปฟิล์มที่ความเข้มข้น 20-40% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าแครอทและมะม่วงสามารถขึ้นรูปได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุดคือ 30% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขณะที่กะหล่ำปลีแดงและมะเขือเทศต้องใช้ความเข้มข้นเป็น 40% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะสามารถลอกออกจากเพลทได้ ขณะที่กล้วยน้ำว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ เนื่องจากกรอบแตก เมื่อผ่านกระบวนการอบ อาจเนื่องมาจากกล้วยน้ำว่าดิบมีองค์ประกอบของแป้งสูงและเพคตินซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นแก่ฟิล์มต่ำ ทำให้ฟิล์มกรอบเปราะและแตกออกมา (Vieira *et al.*, 2011)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของฟิล์มจากผลิตภัณฑ์เภสัช

Sample	Concentration (%w/v)	Film Properties					
		Thickness	Moisture	a_w	Peelability	Color	Appearance
		(mm)	(%)				
Carrot	30	0.08	14.32	0.58	Easy	Orange	Dry, Flexible
Mango	30	0.20	7.66	0.52	Easy	Yellow	Dry, Flexible
Red Cabbage	40	0.12	15.61	0.57	Difficult	Purple	Dry, Brittleness
Tomato	40	0.13	17.22	0.49	Difficult	Dark Red	Sticky, Flexible

1.3 คุณสมบัติของฟิล์มจากผลิตผลเกษตร

ฟิล์มจากผลิตผลเกษตรแต่ละชนิดมีลักษณะคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยแครอทและมะม่วงให้ฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวแห้งและยืดหยุ่นเล็กน้อย ขณะที่กะหล่ำปลีแดงให้ฟิล์มที่มีลักษณะกรอบเปราะ (Brittleness) และมะเขือเทศให้ฟิล์มที่มีลักษณะเหนียวเยิ้ม (ตารางที่ 2) ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันของผลิตผลแต่ละชนิด โดยปริมาณเพคตินและเส้นใยของผลิตผลควรมีสัดส่วนที่เหมาะสมกัน หากปริมาณเส้นใยมีปริมาณมากจะส่งผลให้ฟิล์มมีความกรอบเปราะสูงเช่นเดียวกับฟิล์มจากกะหล่ำปลีแดง ขณะที่น้อยเกินไปจะส่งผลให้ฟิล์มชื้นและเหนียวเยิ้มในลักษณะเดียวกับฟิล์มจากมะเขือเทศ ซึ่งส่งผลต่อการลอกออกจากเพลท และการเก็บรักษา

อย่างไรก็ตามแม้ว่าแครอทและมะม่วงจะให้ฟิล์มที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่เนื้อมะม่วงดิบมีค่าความเป็นกรดสูง คือ pH 3.43 ± 0.07 ส่งผลให้ฟิล์มมีรสเปรี้ยว แครอทจึงมีความเหมาะสมมากกว่าในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปเป็นฟิล์มชีวภาพ

2. ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติของฟิล์ม

ฟิล์มแครอทที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ มีความหนาและความสว่าง (L^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ที่เพิ่ม แต่ไม่มีผลให้เกิดความแตกต่าง ($P \geq 0.05$) ของความชื้น a_w ค่าสี a^* และ b^* ของฟิล์ม (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติของฟิล์มแครอท

Carrot films	Thickness (mm.)	Moisture (%)	a_w	Color Score			Tensile Strength (kgF/cm ²)	Elongation (%)	WVTR * (g/m ² .day)	OTR ** (cm ³ /m ² .day)
				L^*	a^*	b^*				
Control	0.083 ^d	12.67	0.54	44.49 ^c	4.36	9.18	78.58 ^d	9.35	3254.33 ^b	1.45
1.5% Pectin	0.094 ^c	12.60	0.57	44.60 ^c	4.80	8.63	113.14 ^c	8.93	3436.67 ^b	2.29
3.0% Pectin	0.098 ^{bc}	11.96	0.55	45.14 ^{bc}	4.79	8.24	138.67 ^{bc}	9.26	3370.33 ^b	2.50
4.5% Pectin	0.102 ^a	12.58	0.54	45.20 ^{bc}	4.77	8.36	134.89 ^{bc}	10.00	2832.00 ^a	2.34
1.5% Alginate	0.088 ^d	12.40	0.56	46.28 ^{bc}	4.47	8.82	141.17 ^b	10.55	2937.67 ^a	1.63
3.0% Alginate	0.96 ^{bc}	12.80	0.55	47.44 ^b	4.75	9.37	207.12 ^a	10.24	2755.33 ^a	1.78
4.5% Alginate	0.101 ^{ab}	11.64	0.55	48.09 ^a	4.68	9.79	228.40 ^a	7.71	2774.33 ^a	2.02
CV (%)	3.3	5.7	2.0	2.9	12.8	7.1	9.7	31.5	5.1	-

* WVTR = Water Vapor Transmission Rate , **OTR = Oxygen Transmission Rate

ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เมื่อนำฟิล์มมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ไม่ผลให้เกิดความแตกต่างของการยืดตัวของฟิล์ม ($P \geq 0.05$) แต่มีผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงขาดของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P < 0.05$) (ตารางที่ 3) เนื่องจากเพคตินและแอลจินเต้เข้าไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์ของเพคติน ในเนื้อแครอท เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย (network) ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (McHugh and Olsen, 2004) ซึ่งแอลจินเต้มีผลต่อการเพิ่มความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มมากกว่าเพคตินเนื่องจากการเชื่อมพันธะของหมู่เมทิลเอสเทอร์ของเพคตินกับหมู่พอลิกลูโรนของกรดกลูโคนิกในแอลจินเต้นั้นให้โครงสร้างเจลที่แข็งแรงมากกว่า (Mancini and McHugh, 2000) เช่นเดียวกับรายงานของ Galus and Lenart (2013) ซึ่งพบว่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มประกอบแอลจินเต้และเพคติน มีค่าสูงกว่าฟิล์มจากเพคตินอย่างเดียว โดยการเติมแอลจินเต้ที่ 4.5% โดยน้ำหนักผลิตผล มีค่าความต้านทานแรงดึงขาดมากที่สุด คือ 228.40 kgF/cm^2

การเติมไฮโดรคอลลอยด์ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน ตารางที่ 3 อาจเกิดจากการเข้าไปแทรกตัวของในเนื้อแครอทของไฮโดรคอลลอยด์ที่ไม่ได้เข้าไปสร้างพันธะกับเพคตินในเนื้อแครอท ทำให้เส้นใยในเนื้อแครอทซึ่งทำหน้าที่กั้นขวางการผ่านของก๊าซออกซิเจนในลักษณะเดียวกับเส้นใยเซลลูโลส (cellulose whisker) ในเนื้ออะเซโรลา ของ Azeredo *et al.* (2011) เกิดกระจายตัว ทำให้มีช่องว่างให้ก๊าซออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านเข้ามาได้มากขึ้น โดยการเติมแอลจินเต้ทำให้ OTR ของฟิล์มเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเพคตินอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของแอลจินเต้มีความแข็งแรงมากกว่าเพคตินทำให้กั้นการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่า

ขณะที่การเติมแอลจินเต้ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) อาจเป็นผลมาจากแอลจินเต้ส่วนที่ไปสร้างพันธะกับเพคตินในเนื้อแครอท ทำให้โครงสร้างในส่วนเพคตินซึ่งชอบน้ำ (hydrophilic) ของฟิล์มแข็งแรงขึ้น ทำให้ไอน้ำที่ซึมผ่านบริเวณได้น้อยลง เป็นผลให้ WVTR ของฟิล์มลดลงด้วย ขณะที่การเติมเพคตินที่ 4.5% เท่านั้นที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) กับชุดควบคุม ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของฟิล์ม โดย Cuq *et al.*, (1996) กล่าวว่า การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ทำจากวัสดุธรรมชาติจะมีผลมาจากความหนาของฟิล์ม ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ซึ่งมีค่าการซึมผ่าน (permeability) คงที่ไม่ขึ้นกับความหนา

จากคุณสมบัติของฟิล์ม การเติมแอลจินเต้ที่ 3% ของเนื้อแครอท เป็นปริมาณที่ความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปศึกษาต่อ เนื่องจากสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มได้ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$) จากการเติมแอลจินเต้ที่ 4.5% และให้ค่า WVTR ต่ำที่สุด คือ $2,755.33 \text{ g/m}^2.\text{day}$

3. ศึกษาปริมาณโซลิตอลที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม

ฟิล์มจากเนื้อแครอทที่เติมแอลจินเต้มีการยืดตัวต่ำ การเติมสารกลุ่มพอลิแอลกอฮอล์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นแก่ฟิล์มได้ โดยปรับชนิดพลาสติกไซเซอร์จากกลีเซอรอลโดย Wang *et al.* (2011) เป็นโซลิตอล เนื่องจากมีแคลอรีต่ำกว่าและความหวานเทียบเท่าน้ำตาลซูโครส (พิมพ์เพ็ญ และ นิธิยา, <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1628/sugar-alcohol>) เติมที่ระดับ 1.25-6.25% โดยน้ำหนักของผลิตผล ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับการเติมกลีเซอรอลของ Wang *et al.* (2011) (1.26-6.30%) พบว่า ปริมาณโซลิตอลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของฟิล์มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังแสดง

ใน ตารางที่ 4 โดยพบว่าปริมาณไซลิทอลส่งผลให้ฟิล์มมีความหนา การละลายน้ำ และความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากไซลิทอลเป็นสารที่ชอบน้ำและละลายน้ำได้ เข้าไปแทรกตัวในเนื้อฟิล์ม ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในของพอลิเมอร์ลดลง การละลายน้ำและความชื้นของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น ขณะที่ความสว่างของฟิล์มลดลงจากการกระจายตัวข้างต้น ส่วนความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเติมไซลิทอลทำให้ความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น ขณะที่พื้นที่เตรียมฟิล์มเท่าเดิมจึงส่งผลให้ความหนาเพิ่มมากขึ้น

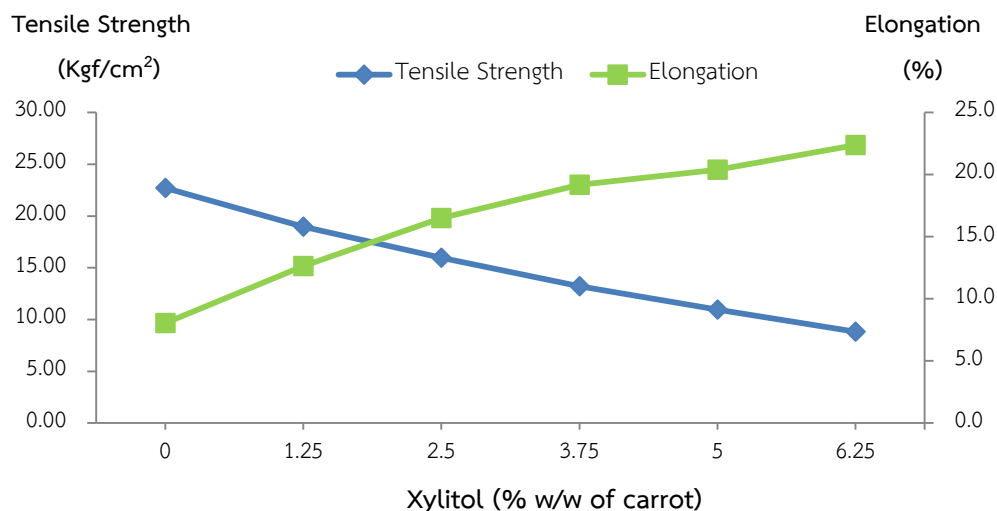
ตารางที่ 4 ผลของไซลิทอลต่อฟิล์มแครอท-แอลจิเนต

% Xylitol	Thickness (mm)	Solubility (%)	moisture (%)	a _w	Color score			Tensile Strength (kgF/cm ²)	Elongation (%)	WVTR (g/m ² .day)	OTR (cm ³ / m ² .day)
					L*	a*	b*				
Control	0.09 ^c	68.68 ^c	13.42 ^d	0.47	48.75 ^a	3.96 ^{ab}	9.22	229.87 ^a	8.06 ^e	3283.00 ^a	1.61
1.25%	0.10 ^c	70.70 ^d	14.15 ^c	0.48	48.35 ^{ab}	3.92 ^{ab}	8.82	192.01 ^b	12.65 ^d	3619.75 ^b	1.88
2.5%	0.10 ^c	71.50 ^c	14.76 ^c	0.48	48.13 ^{bc}	3.75 ^b	9.06	161.50 ^c	16.49 ^c	3691.75 ^b	1.76
3.75%	0.11 ^b	74.81 ^{ab}	14.57 ^b	0.48	48.10 ^{bc}	4.13 ^{ab}	9.39	133.60 ^d	19.18 ^b	4241.00 ^c	1.89
5%	0.11 ^{ab}	74.33 ^b	15.04 ^b	0.48	47.73 ^{cd}	4.40 ^a	9.32	110.97 ^d	20.40 ^b	4127.50 ^c	2.36
6.25%	0.11 ^a	76.00 ^a	15.68 ^a	0.48	47.34 ^d	4.12 ^{ab}	8.87	89.36 ^e	22.38 ^a	4044.50 ^c	2.62
CV	3.4	4.3	4.1	5.9 ^{ns}	0.8	7.9	4.5 ^{ns}	5.2	7.4	4.1	-

* WVTR = Water Vapor Transmission Rate , **OTR = Oxygen Transmission Rate

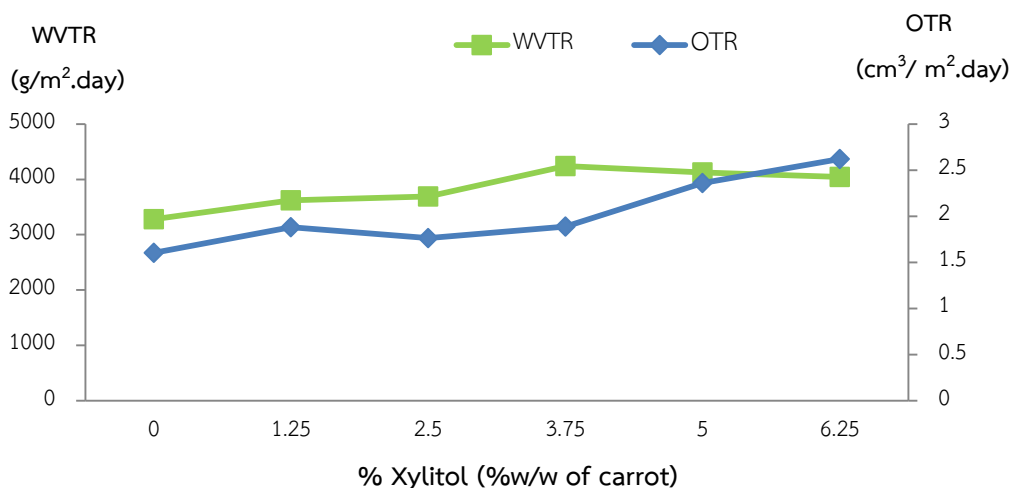
ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

การเติมไซลิทอลส่งผลให้การยึดตัวฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มลดลง ดังแสดงใน ตารางที่ 4 และ รูปที่ 1 โดยที่เติมไซลิทอลที่ปริมาณ 6.25% โดยน้ำหนักผลิตผลให้การยึดตัวสูงที่สุด คือ 22.38 % และความต้านต่อแรงดึงขาดต่ำที่สุดคือ 89.36 kgF/cm² เนื่องจากการเข้าไปแทรกตัวของไซลิทอลที่กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้แรงยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์อ่อนแอลง ความแข็งแรงจึงลดลง และการยึดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองของ Wang *et al.* (2011) ที่การเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นส่งผลให้ฟิล์มแครอทมีการยึดตัวเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 1 ผลของไซลิทอลต่อคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มแครอท-แอลจินเนต

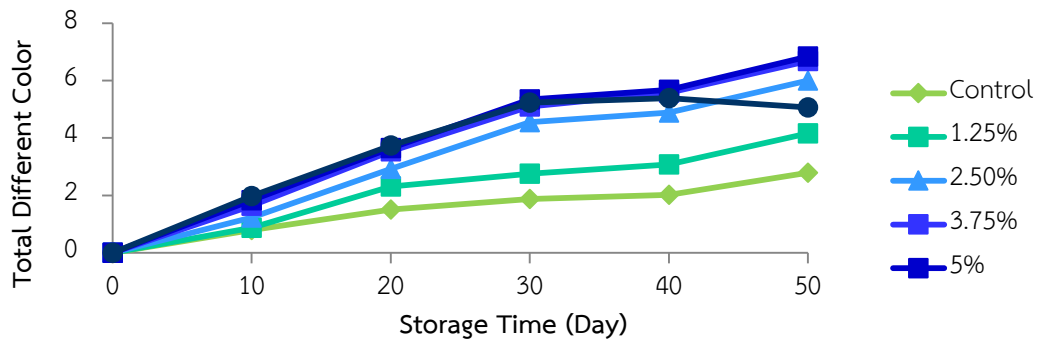
ระดับไซลิทอลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า OTR และ WVTR ของฟิล์ม มีแนวโน้มสูงขึ้น ดังแสดงใน ตารางที่ 4 และ รูปที่ 2 เนื่องจากไซลิทอลจะเข้าไปแทรกตัวในเนื้อฟิล์มทำให้เกิดช่องว่างขึ้นทำให้ ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำสามารถผ่านฟิล์มได้มากขึ้น อีกทั้งไซลิทอลยังเป็นสารชอบน้ำอาจเป็นตัวเหนียวนำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่ฟิล์มได้มากขึ้นด้วย โดยฟิล์มที่ไม่เติมไซลิทอลมีค่า OTR และ WVTR ต่ำที่สุดคือ 1.61 cm³/ m².day และ 3,283 g/m².day ตามลำดับ ขณะที่ฟิล์มที่เติมไซลิทอล 6.25% จะมีค่า OTR สูงที่สุดคือ 2.62 cm³/ m².day แต่ฟิล์มที่เติมไซลิทอล 3.75% มีค่า WVTR สูงกว่าการเติมที่ระดับอื่นๆ คือ 4,241 g/m².day ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของฟิล์มแครอทที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ ส่งผลให้ค่า WVTR ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง



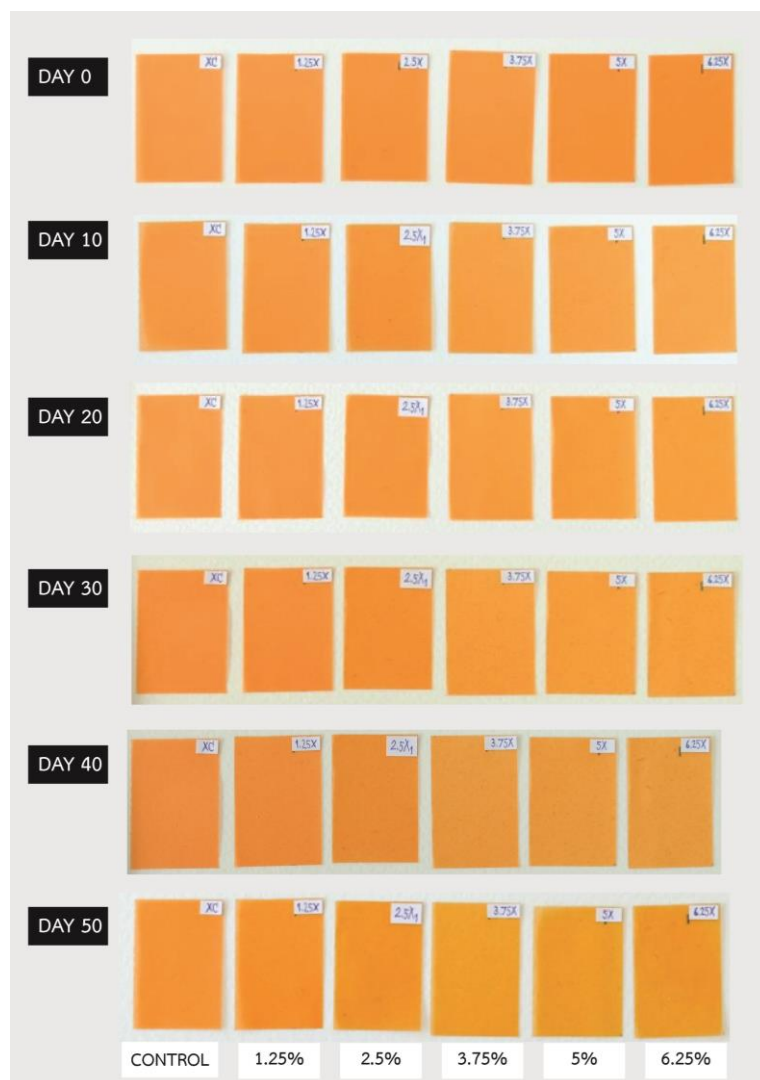
รูปที่ 2 ผลของไซลิทอลต่อคุณสมบัติการกั้นผ่านของฟิล์มแครอท-แอลจินเนต

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแครอทระหว่างการเก็บ 50 วัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงสี (TCD) ของฟิล์มสูงขึ้นเมื่อระดับไซลิทอลเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) อาจเนื่องจากฟิล์มสูญเสียเบต้าแคโรทีนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ โดยน้ำที่ไซลิทอลเหนียวนำเข้ามาอาจเป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ตามคำอธิบายของนิธิยา (2553) ที่ว่าปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำส่งเสริมให้ปฏิกิริยาต่างๆ ในผลิตภัณฑ์แห้งที่มีค่า a_w ในช่วง 0.3-0.8 เกิด

เร็วขึ้น โดยในการเก็บที่ 40 พบว่าฟิล์มที่เติมไฮลิทอลที่ระดับ 6.25% โดยน้ำหนักผลิตผลเริ่มมีการเคลื่อนย้ายของ โมเลกุลไฮลิทอลออกมาสู่ผิวฟิล์ม เกิดเป็นรอยสีขาวทำให้ค่า TCD ของฟิล์มผกผันไป



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มระหว่างการเก็บ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มระหว่างการเก็บ

การทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า การเติมโซลิตอล 6.25% โดยน้ำหนักผลิตผล ให้ค่าการยืดตัวสูงสุด แต่ฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างเหนียวติดกัน เก็บรักษาได้ยาก และมีอายุการเก็บสั้นกว่าตัวอย่างอื่น เนื่องจากการเคลื่อนย้ายของโซลิตอลสู่ผิว การเติมโซลิตอลที่ระดับ 3.75% ของเนื้อแครอท จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากให้คุณสมบัติต่างๆ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) กับการเติมโซลิตอลที่ 5% โดยน้ำหนักผลิตผล และมีค่า OTR ต่ำกว่า

4. การนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

4.1 ทดสอบคุณภาพและความปลอดภัยของการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

ผลการตรวจเชื้อจุลินทรีย์แสดงใน ตารางที่ 5 พบว่าจุลินทรีย์ที่พบอยู่ในเกณฑ์ของประกาศมาตรฐานอุตสาหกรรม ของผลไม้แห้งคือ ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดต้องน้อยกว่า 1×10^6 cfu/g ยีสต์ไม่เกิน 1×10^4 cfu/g ราไม่เกิน 500 cfu/g และ *E. Coli* <3.0 MPN/g (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , 2550)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ของฟิล์มแครอท

รายการวิเคราะห์	ผลการทดสอบ
Total Bacteria Count	< 2.5×10^2 cfu/g
Yeast and Mold	est. 2.5×10 cfu/g
<i>E. Coli</i>	<3.0 MPN/g
<i>Staphylococcus aureus</i>	<10 est. cfu/g
<i>Samonella</i> spp.	ND in 10 g
<i>Clostridium perfringers</i>	ND in 0.1 g

ฟิล์มแครอทมีคุณค่าทางโภชนาการดังแสดงใน ตารางที่ 6 พบว่าฟิล์มมีปริมาณวิตามินเอสูงคือ 7,219.48 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม และมีค่าการต้านอนุมูลอิสระเป็น 1,773.37 $\mu\text{mol TE}/100$ g จากเบต้าแคโรทีนในเนื้อแครอท

ตารางที่ 6 โภชนาการของฟิล์มแครอท

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ
พลังงานทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	331.40
พลังงานจากไขมัน (กิโลแคลอรี)	5.76
ไขมันทั้งหมด (กรัม)	0.64
ไขมันอิ่มตัว (กรัม)	0.12
โคเลสเตอรอล (มิลลิกรัม)	
โปรตีน (กรัม)	4.33
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	77.08

ใยอาหาร (กรัม)	25.61
น้ำตาล (กรัม)	24.57
โซเดียม (มก.)	2,019.92
วิตามินเอ * (ไมโครกรัม)	7,219.48
เบต้าแคโรทีน	43,316.86
วิตามิน บี 1 (มิลลิกรัม)	0.048
วิตามินบี2 (มิลลิกรัม)	0.062
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	170.73
เหล็ก (มิลลิกรัม)	3.50
ถั่ว (กรัม)	7.07
ความชื้น (กรัม)	10.88
Antiradical Scavenging DPPH- ($\mu\text{mol TE}$)**	1,773.37

* Calculate from Betacarotene, **TE = Trolox Equivalent

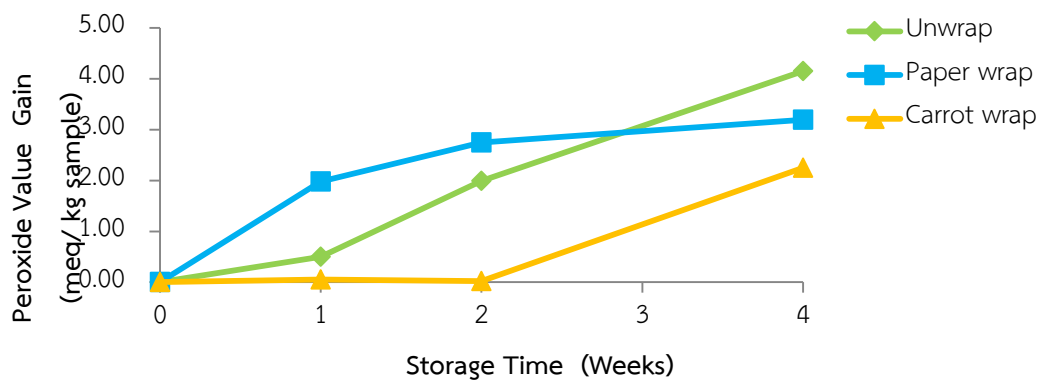
4.2 ศึกษาการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ลูกอมกะทิ

ฟิล์มซึ่งมีการต้านอนุมูลอิสระที่ดีและค่า OTR ที่ต่ำแต่ไม่สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ จึงนำมาประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์ปฐมภูมิ ได้แก่ ฟิล์มห่อผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการหืน ก่อนบรรจุในถุง Zip lock

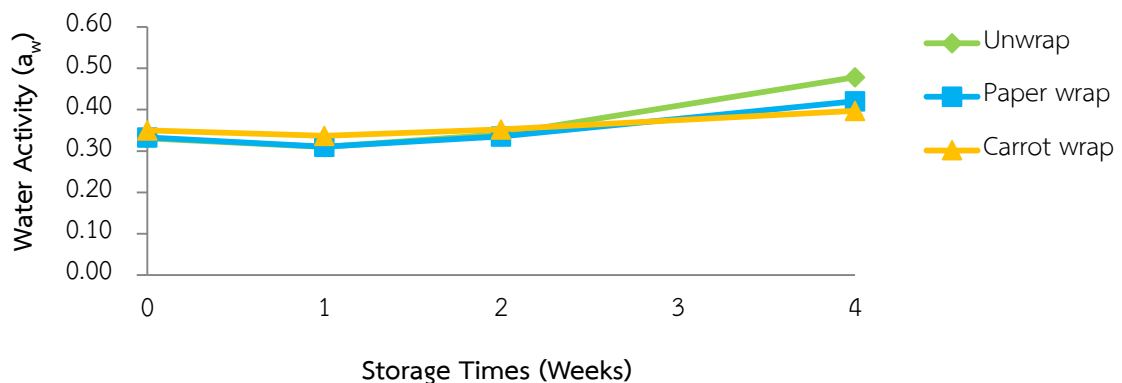
โดยใช้ลูกอมถั่วกะทิเป็นกรณีศึกษา เปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในท้องตลาด คือ กระดาษไข และลูกอมถั่วกะทิที่ไม่ห่อ (รูปที่ 5) ลูกอมถั่วกะทิที่ห่อด้วยฟิล์มแครอทมีการเพิ่มของค่าเปอร์ออกไซด์ที่ช้ากว่าลูกอมที่ไม่ห่อและห่อกระดาษไข ดังแสดงใน รูปที่ 6 โดยเฉพาะช่วง 2 สัปดาห์แรกที่ค่าเปอร์ออกไซด์แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ขณะที่ค่า a_w ของการบรรจุทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 7 โดยลูกอมที่บรรจุในฟิล์มแครอทมีการเพิ่ม a_w ช้ากว่าการบรรจุอีก 2 ชนิด



รูปที่ 5 ลักษณะปรากฏของลูกอมถั่วกะทิ



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ของลูกอมถั่วกะทิระหว่างการเก็บ



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่า a_w ของลูกอมถั่วกะทิระหว่างการเก็บ

5. คำนวณต้นทุนการผลิตแผ่นฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลัง

ต้นทุนการผลิตฟิล์มจากแครอทเท่ากับ 3.69 – 4.71 บาท/แผ่นฟิล์มขนาด 28x28 cm² สามารถตัดเป็นฟิล์มขนาด 7x9 cm² ได้ 12 แผ่น

9. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ :

1. การคัดเลือกผลิตผลสำหรับขึ้นรูปเป็นฟิล์มชีวภาพ โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตผล 5 ชนิด ได้แก่ กล้วยน้ำว่าดิบ แครอท มะม่วงดิบ กะหล่ำปลีแดง และมะเขือเทศ และนำมาขึ้นรูปตามวิธีของ McHugh et al. (1996) และศึกษาคุณสมบัติฟิล์ม พบว่าองค์ประกอบทางเคมีส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม โดยปริมาณเพคตินและเส้นใยในเนื้อผลไม้ต้องมีสัดส่วนที่เพียงพอและเหมาะสม โดยแครอทใช้ปริมาณในการขึ้นรูป 30% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ฟิล์มสามารถลอกออกจากเพลทได้ง่าย แข็งไม่เหนียวและไม่แตกเปราะ จึงเป็นผลิตผลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาพัฒนาเป็นฟิล์มบิโโรคได้
2. การศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติของฟิล์ม โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์ 2 ชนิด ได้แก่ เพคตินชนิดเมทอกซิลสูง และแอลจินที่ระดับ 1.5-4.5% โดยน้ำหนักผลิตผล พบว่าไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิดส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลและค่า OTR ของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ส่งผลต่อค่า

WVTR แตกต่างกัน คือ เพคตินส่งผลให้ WVTR ของฟิล์มสูงขึ้น ขณะที่แอลจินเตส่งผลให้ WVTR ของฟิล์มลดลง การเติมแอลจินตที่ 3% ของเนื้อแครอท เป็นปริมาณที่ความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปศึกษาต่อ เนื่องจากสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มได้ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$) จากการเติมแอลจินตที่ 4.5% และให้ค่า WVTR ต่ำที่สุด

3. ศึกษาปริมาณไซลิทอลที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม โดยปรับชนิดพลาสติกไซเซอร์จากกลีเซอรอลโดย Wang *et al.* (2011) เป็นไซลิทอล เนื่องจากมีแคลอรีต่ำกว่าและความหวานเทียบเท่ากับน้ำตาลซูโครส ปริมาณ 1.25-6.25% โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ช่วงเดียวกับการเติมกลีเซอรอลของ Wang *et al.* (2011) (1.26-6.30%) พบว่าปริมาณไซลิทอลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความหนา การละลายน้ำ ความชื้น การยืดตัว ค่า OTR และ WVTR เพิ่มขึ้น ขณะที่ความสว่างของฟิล์มลดลง สีของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นเมื่อปริมาณไซลิทอลในตัวอย่างเพิ่มขึ้น การเติมไซลิทอลที่ระดับ 3.75% ของเนื้อแครอท จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากให้คุณสมบัติต่างๆ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) กับการเติมไซลิทอลที่ 5% โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ และมีค่า OTR ต่ำกว่า ขณะที่ตัวอย่างที่เติมไซลิทอล 6.25% มีลักษณะเหนียวติดกันเก็บรักษาได้ยาก และมีการเคลื่อนย้ายของไซลิทอลสู่ผิวในวันที่ 40
4. นำฟิล์มที่คัดเลือก ทดสอบปริมาณจุลินทรีย์พบว่าจุลินทรีย์ที่พบอยู่ในเกณฑ์ของประกาศมาตรฐานอุตสาหกรรมและเมื่อทดสอบคุณค่าทางโภชนาการ พบว่า ฟิล์มมีปริมาณวิตามินเอสูงคือ 7,219.48 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม และมีค่าการต้านอนุมูลอิสระเป็น 1,773.37 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ นำมาประยุกต์เป็นฟิล์มห่อผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการหืน เปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในท้องตลาด คือ กระดาษไข และลูกอมถั่วกะทิที่ไม่ห่อพบว่าค่า Peroxide Value และ aw ของลูกอมถั่วกะทิมิแนวโน้มเพิ่มขึ้นช้ากว่าลูกอมไม่ห่อ และห่อกระดาษไข
5. ต้นทุนการผลิตฟิล์มจากแครอทเท่ากับ 3.69 – 4.71 บาท/แผ่นฟิล์มขนาด $28 \times 28\text{ cm}^2$ สามารถตัดเป็นฟิล์มขนาด $7 \times 9\text{ cm}^2$ ได้ 12 แผ่น

10. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ :

สามารถนำไปเผยแพร่และพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ห่ออาหารลูกอมและอาหารแห้ง

11. คำขอบคุณ : -

12. เอกสารอ้างอิง :

จรัสแท้ ศิริพานิช. 2539. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.

นิธิยา รัตนพานนท์. 2553. เคมีอาหาร. โอ.เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ. 504 หน้า.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนพานนท์. น้ำตาลแอลกอฮอล์. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก:

<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1628/sugar-alcohol>. สืบค้น 5 มีนาคม 2559.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2550. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง แก้วผลิตภัณฑ์ชุมชน: ผลไม้แห้ง. มผช. 1471/2550.

- อรัญญา มิ่งเมือง. 2007. ผลของส่วนผสมและกระบวนการผลิตต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบริโภคนได้. Food. 37(4):353-359.
- AOAC. 1990. Association of Official Chemists, Official Methods of Analysis. 15th ed. Washington, D.C.
- AOCS. 1997. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society. 5th edn. AOCS Press, Champaign, Illinois.
- American Society for Testing and Materials. 1994. Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. ASTM D882-10. Annual of ASTM Standard. Philadelphia.
- Azeredo, H.M.C., K.W.E. Miranda, M.F. Rosa, D.M. Nascimento and M.R. Moura. 2011. Edible films from alginate-acerola puree reinforced with cellulose whiskers. LWT- Food Science and Technology. 46:294-297.
- Cuq, B., N. Gontard., J. Cuq, and S. Guibert. 1996. Functional properties of myofibrillar protein-based biopackaging as affected film by thickness. Journal of Food Science. 61(3):580-584.
- Galus, S. and A. Lenart . 2013. Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. Journal of Food Engineering. 115(4):459-465.
- Karina, P., P.V. Nielsen, G. Bertelsen, M. Lawther, M.B. Olsen, N.H. Nilsson and G. Mortensen. 1999. Potential of biobased materials for food packaging. Trends in Food Science and Technology. 10(2):52-68.
- Li, F.M., T. Li, W. Li and L.D. Yang. 2015. Changes in antioxidant capacity, levels of soluble sugar, total polyphenol, organosulfur compound and constituents in garlic clove during storage. Industrial Crops and Products 69: 137-142.
- Mancini, F. and T.H. McHugh. 2000. Fruit-alginate interactions in novel restructured products. Nahrung. 44(3):152-157.
- McHugh, T.H., C.C. Huxsoll and J.M. Krochta. 1996. Permeability properties of fruit puree edible films. Journal of Food Science, 61(1):88-91.
- McHugh, T.H. and C.W. Olsen. 2004. Tensile properties of fruit and vegetable edible films. United States-Japan Cooperative Program in Natural Resources. 104-108.
- Rojas-Graü, M.A., R.J. Avena-Bustillos, C. Olsen, M. Friedman, P.R. Henika, O. Martín-Belloso, Z. Pan and T.H. McHugh. 2007. Effects of plant essential oils and oil

- compounds on mechanical, barrier and antimicrobial properties of alginate-apple puree edible films. *Journal of Food Engineering*. 81:634-641.
- Ruck, A.J. 1995. *Chemical Methods for Analysis of fruit and vegetable products*. Department of Agriculture, Canada.
- Sothornvit, R. and J.M. Krochta. 2000. Plasticizer effect on oxygen permeability of β -lactoglobulin films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48:6298-6302.
- Su, J.F., Huang, Z., Yuan, X.Y., Wang, X.Y. and Li, M. 2010. Structure and properties of carboxymethyl cellulose/soy protein isolate blend edible films crosslinked by Maillard reactions. *Carbohydrate Polymers*. 79:145-153.
- Tharanathan R.N. 2003. Review: Biodegradable films and composite coating: past, present and future. *Trends in Food Science and Technology*. 14:71-78.
- Tharanathan R.N. and N. Saroja. 2001. Hydrocolloid-based packaging film-alternate to synthetic plastics. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 60:547-559.
- Tong, Q., Q. Xiao and L.T. Lim. 2013 Effects of glycerol, sorbitol, xylitol and fructose plasticizers on mechanical and moisture barrier properties of pullulan-alginate-carboxymethylcellulose blend films. *International Journal of Food Science and Technology*. 48:870-878.
- Tongdeesoontorn, W., Mauer, L.J., Wongruong, S., Sriburi, P. and Rachtanapun, P. 2011. Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films. *Chemistry Central Journal*. 5:6. (Online). Available: <http://journal.chemistrycentral.com/content/pdf/1752-153X-5-6.pdf> (1 September 2014)
- Vieira, M.G.A., M.A.S. Silva, L.O. Santos and M. Beppu. 2011. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *European Polymer Journal*, 47(3):254-263.
- Wang, X., X. Sun, H. Liu, M. Li and Z. Ma. 2011. Barrier and mechanical properties of carrot puree films. *Food and Bioproducts Processing*. 89:149-156
- Yadav, S., N. Yadav and S.P. Khurana. 2014. Facts about natural Vs artificial sugars. *Indian journal of Health and Wellbeing*. 5(7):796-801.
- Yoo, S. and J.M. Krochta. 2012. Starch-methylcellulose-whey protein film properties.

13. ภาคผนวก :-