

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบริโกล
ได้ระบบหลายองค์ประกอบจากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอบที่นิลซักซิเนต

โดย

ผศ.ดร.ดวงใจ ธีรธรรมถาวร และคณะ

มิถุนายน 2557

โครงการ การปรับปรุงสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบริโกลได้ระบบ
หลายองค์ประกอบจากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรออกทีนิลซัคซิเนต

คณะผู้วิจัย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร
2. รองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ
3. รองศาสตราจารย์ สายสนม ประดิษฐ์ดวง

สังกัด

- มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

สตาร์ชเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตฟิล์มบริโกลได้ แต่มีสมบัติด้านการป้องกันการแพร่ผ่านของไอน้ำที่ไม่ดี ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการผสมกรดไขมันลงไปในฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปรรูปที่นิลซัคซิเนตซึ่งเป็นสตาร์ชตัดแปรที่มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการป้องกันการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและระดับของลิพิดต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลได้ และศึกษาผลของการเคลือบต่อสมบัติของขนมข้าวอบกรอบอะราเร่ ลิพิด 3 ชนิดที่ศึกษา ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดสเตียริก และกรดปาล์มมิติก และความเข้มข้นของลิพิด 3 ระดับ ได้แก่ อัตราส่วนลิพิดต่อสตาร์ช เท่ากับ 0:1, 0.1:1 และ 0.2:1 โดยใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และตรวจสอบสมบัติของฟิล์มในด้านต่างๆ ดังนี้ โครงสร้างระดับจุลภาค, อันตรกิริยาภายในแผ่นฟิล์ม, การเกิดผลึก, สีและความขุ่น, สมบัติเชิงกลและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ จากนั้นเลือกสูตรที่ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำสุดเพื่อเคลือบขนมข้าวอบกรอบอะราเร่ และทดสอบซอร์ปชันไอโซเทอม สมบัติทางกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัส จากการศึกษ พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ มีค่า Tensile strength และ Elastic modulus ต่ำกว่า และมีค่า %Elongation at break สูงกว่าสูตรควบคุม (ไม่ผสมลิพิด) ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจากสตาร์ชตัดแปรรูปที่นิลซัคซิเนตต่ำลง เมื่อผสมกรดไขมันอิ่มตัวที่ระดับความเข้มข้นของกรดไขมันต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1 ฟิล์มที่ไม่ผสมกรดไขมันมีความขุ่นและผิวหน้าขรุขระมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมกรดไขมัน ยกเว้นฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกที่ระดับความเข้มข้น 0.2 ต่อ 1 ขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบสารเคลือบจากสตาร์ชตัดแปรรูปที่นิลซัคซิเนตที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัว มีปริมาณความชื้นที่ระดับชั้นโมโนเลเยอร์ (M_0) ต่ำกว่า และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติ (critical water activity) สูงกว่าขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบสารเคลือบไม่ผสมกรดไขมัน และจากการทดสอบโดยวิธี General Quantitative Descriptive Analysis ด้วยผู้ชิมที่ผ่านการฝึกฝน พบว่า ขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ (มีกรดไขมัน และไม่มีกรดไขมัน) มีความเปรี้ยว, ความแข็ง และความเหนียวติดปากติดฟัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ABSTRACT

Starch is an appropriate matrix-forming material of edible film. However, film made only from starch has poor water vapor barrier. This research, fatty acids were incorporated into films based on octenyl succinate tapioca starch, which are attracted to, and stabilize the oil-water interface of an emulsion. The objectives were to study the effect of lipid type and concentration on the properties of edible film based on octenyl succinate starch and to study the effect of the coating on areare's properties. Three types of lipids (stearic acid (SA), palmitic acid (PA) and oleic acid (OA)) applied at different ratios of lipid to starch (0:1, 0.1:1 and 0.2:1) were used in this study. Sorbitol was used as a plasticizer. Edible films were prepared by a casting method. The film microstructure, molecular interaction, crystallization, opacity, mechanical properties and water vapor permeability (WVP) were evaluated. The lowest WVP formulation was then selected to coat areare rice cracker and tested for sorption isotherm, physical and sensory properties. The results were found that lipid addition in the films provoked a decrease in the tensile strength and elastic modulus and an increase in %elongation at break. A decreasing in WVP was found in the sample containing saturated fatty acid at ratios of lipid to starch 0.2:1. The control films (without lipid) showed rough surface and less transparency as compared to starch-lipid films except films containing oleic acid. The rice cracker coated with the solution containing saturated fatty acid had less monolayer moisture content and greater critical water activity than the lipid-free coated sample. The sensory evaluation, general quantitative descriptive analysis, tested by trained panels presented that type (PA and SA) and amount of lipid (0-20%) had no significant effect on brittleness, hardness and sticky mouth coating of the coated rice cracker ($P>0.05$).

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ รองศาสตราจารย์ สายสนม ประดิษฐ์ดวง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำปรึกษาและให้แนวคิดที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ดวงใจ ถิรธรรมถาวร

มิถุนายน 2557

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
ฟิล์มบริโกลไค์.....	3
สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต.....	4
ลิพิด.....	6
ฟิล์มประกอบ.....	11
การประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวบริโกลไค์ในผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง.....	18
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	23
วัตถุประสงค์.....	23
สารเคมี.....	23
อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	23
วิธีการทดลอง.....	24
การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	26
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	27
ผลของชนิดและปริมาณลิพิดต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลไค์.....	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

	ผลของสารเคลือบจากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอบที่นิลชัคซิเนตและ ลิวิตต่อคุณภาพของขนมข้าวอบกรอบ.....	45
5	สรุปผลการทดลอง.....	58
	บรรณานุกรม.....	59
	ภาคผนวก.....	68
	ภาคผนวก ก วิธีการเตรียม.....	69
	ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	78
	ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	86
	ภาคผนวก ง ตารางผลการทดลอง.....	92
	ภาคผนวก จ ภาพผลการทดลอง.....	94
	ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์สมบัติสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอบ และ สตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตัดแปรรอบ.....	104
	ภาคผนวก ช ผลการทดสอบสมบัติอิมัลชัน.....	107
	ภาคผนวก ซ แบบประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	โครงสร้างและจุดหลอมเหลวของกรดไขมัน.....	8
2	ผลของชนิดและความเข้มข้นของลิพิดต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำ ของฟิล์ม.....	14
3	ผลของชนิดและความเข้มข้นของลิพิดต่อ สมบัติเชิงกลของฟิล์มบริโกลไกด์.....	16
4	ค่าคงที่ของขมข้าวอบกรอบที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ GAB และ BET ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	49
5	ปริมาตรจำเพาะ (cm ³ /g) และร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบ..... ของขมข้าวอบกรอบสูตรต่างๆ.....	51
6	แรงที่ใช้ในการทำให้อย่างแตกในครั้งแรก, แรงกดสูงสุด..... ทดสอบด้วยเครื่อง Texture analyzer.....	57
7	คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขมข้าวอบกรอบด้านความเปรี้ยว, ความแข็ง..... และความเหนียวติดปากติดฟัน ทดสอบด้วยวิธี Quantitative Descriptive..... Analysis โดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน.....	57
8	ระดับและตัวอย่างอ้างอิงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ลักษณะทางประสาทสัมผัส.....	84
9	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Tensile strength ของตัวอย่างฟิล์ม.....	87
10	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Elastic modulus ของตัวอย่างฟิล์ม.....	87
11	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %Elongation at break ของตัวอย่างฟิล์ม.....	87
12	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาของตัวอย่างฟิล์ม.....	88
13	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของตัวอย่างฟิล์ม.....	88
14	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ..... ของตัวอย่างฟิล์ม.....	88
15	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาตรจำเพาะของขมข้าวอบกรอบสูตรต่างๆ.....	89
16	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนผลิตภัณฑ์.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
17	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงที่ใช้ในการทำให้ได้อย่างแตกในครั้งแรก..... ด้วยเครื่อง Texture analyzer.....89
18	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงกดสูงสุด ด้วยเครื่อง Texture analyzer.....89
19	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ..... ด้านความเปราะ.....90
20	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ..... ด้านความแข็ง.....90
21	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ..... ด้านความเหนียวติดช่องปากและฟัน.....91
22	ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงที่ใช้ในการทำให้..... ตัวอย่างแตกในครั้งแรกที่ได้จากเครื่อง Texture analyzer กับค่าความเปราะ..... ที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี General Quantitative..... Descriptive Analysis โดยผู้บริโภครที่ได้รับการฝึกฝนจำนวน 10 คน..... ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.....91
23	อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ..... และความหนาของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมัน..... ในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส..... ทดสอบ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75±5.....93
24	ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง) ของขนมข้าวอบกรอบสูตรต่างๆ.....93
25	องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปร.... แบบออกทีนิลซัคซิเนต.....105
26	ค่าขนาดอนุภาคไขมันเฉลี่ย ($d_{3,2}$) ของอิมัลชัน ซึ่งเตรียมจากแป้งคัดแปรออกทีนิลซัคซิ- เนต ที่เติมด้วยกรดไขมันชนิด และระดับต่างๆ..... 108

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีไฟเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียงการตัดแปรรสตา์ช..... ออกที่นิลซ์คซิเนต..... 5
2	สูตร โครงสร้างของ โมกุลสตา์ชออกที่นิลซ์คซิเนต.....5
3	X-ray diffraction patterns ของกรดสเตียริก.....10
4	X-ray diffraction patterns ของกรดปาล์มมิติก..... 10
5	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตา์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ.....28
6	ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตา์ชและกรดไขมัน..... ในอัตราส่วนต่างๆ..... 32
7	สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบระหว่างสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด)..... กับฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิก โดยมีอัตราส่วนระหว่างกรดโอเลอิก:สตา์ช..... เท่ากับ 0.1:1และ0.2:1.....36
8	สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบระหว่างสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด)..... กับฟิล์มที่ผสมกรดสเตียริก โดยมีอัตราส่วนระหว่างกรดสเตียริก:สตา์ช..... เท่ากับ 0.1:1 และ0.2:1.....38
9	สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบระหว่างสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด)..... กับฟิล์มที่ผสมกรดปาล์มมิติก โดยมีอัตราส่วนระหว่างกรดปาล์มมิติก:สตา์ช..... เท่ากับ 0.1:1 และ0.2:1..... 38
10	ค่า Tensile strength, ค่า Elastic modulus และ ค่า %Elongation at break..... ตัวอย่างที่เตรียมจากสตา์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ..... 40
11	ผลึกไขมันภายในฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตา์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ..... 42
12	ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ ของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตา์ช..... และกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ.....44
13	ค่าความขุ่น (Opacity) ของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตา์ชและกรดไขมัน..... ในอัตราส่วนต่างๆ.....45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27	สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดโอเลอิก อัตราส่วน..... ระหว่างกรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2..... 101
28	ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical water activity) ของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบ..... ด้วยสารเคลือบ ไม่ผสมลิพิด..... 102
29	ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical water activity) ของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบ..... ด้วยสารเคลือบสตาร์ชต่อกรดปาล์มมิติก 1:0.2..... 102
30	ค่าความชื้นวิกฤติ (Critical water activity) ของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบ..... ด้วยสารเคลือบสตาร์ชต่อกรดสเตียริก 1:0.2..... 103
31	เปรียบเทียบภาคตัดขวางของขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบและหลังเคลือบด้วย..... สารเคลือบ ไม่ผสมลิพิด (NL), สารเคลือบผสมกรดปาล์มมิติก (PA)..... และสารเคลือบผสมกรดสเตียริก (SA)..... 103
32	แสดงการแยกชั้นน้ำมันในสตาร์ชมันสำปะหลังดิบหลังผ่านการ โฮโมจีไนซ์เซชัน 105
33	พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงความชื้นหนืดของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ (native) เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนต (OSA) ทดสอบที่ความ เข้มข้นร้อยละ 5 โดยใช้เครื่อง Rapid Visco-Analyzer..... 106
34	ความหนืด (cP) ของอิมัลชัน ซึ่งเตรียมจากแป้งตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนต ที่เติมด้วยกรด ไขมันชนิด และระดับต่างๆ โดยวัดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer ด้วยหัววัดเบอร์ 1 ความเร็วรอบ 30 rpm และอุณหภูมิ 25°C.....108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาฟิล์มบริโกลได้และสารเคลือบผิวเพื่อใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในวงการอุตสาหกรรมอาหารฟิล์มบริโกลได้ (edible film) เข้ามามีบทบาทและความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่รับประทานได้และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradable) และจะมีบทบาทมากยิ่งขึ้นในอนาคต การพัฒนาฟิล์มบริโกลได้นั้นมีอยู่ในสภาพที่เป็นแผ่นฟิล์ม (film sheet) หรือเป็นสารเคลือบ (coating) โดยช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงในด้านกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏ รวมทั้งการควบคุมการเคลื่อนที่ของความชื้นและควบคุมอัตราการแลกเปลี่ยนของก๊าซ (Ayranci และ Tunc, 2001; Jiménez และคณะ, 2010)

ฟิล์มบริโกลได้ทำมาจากลิพิด และ/หรือ ไฮโดรคอลลอยด์ เช่น โปรตีน และ โพลีแซคคาไรด์ (Jiménez และคณะ, 2010) ฟิล์มจากสตาร์ชจัดเป็นฟิล์มจากโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งลักษณะฟิล์มที่ได้จะไม่มัน มีกลิ่นไม่เหม็นคาว ไม่มีกลิ่นรส ไม่เป็นพิษ แสดงสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น และเป็นตัวขัดขวางแก๊สที่ดี สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของออกซิเจนได้ดี แต่ตามธรรมชาติของสตาร์ชที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงเป็นตัวขัดขวางความชื้นที่ไม่ดี การผสมสารประเภทไขมันช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจากสตาร์ช (García และคณะ, 2000) แต่สตาร์ชดิบไม่มีสมบัติในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ จึงทำให้เกิดการแยกชั้นของไขมันได้เมื่อดังตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง งานวิจัยนี้จึงได้มีการนำสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรออกทีนิลซัคซินเตมาผลิตเป็นฟิล์ม ซึ่งสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรออกทีนิลซัคซินเตมาเป็นสตาร์ชที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยลดส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และเพิ่มส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงสามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์และเพิ่มความคงตัวให้กับระบบอิมัลชัน (Sweedman และคณะ, 2013)

โดยทั่วไปความยาวของสายโซ่และระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันจะเป็นตัวกำหนดสมบัติที่ต่างกันของกรดไขมัน ได้แก่ ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยา สถานะที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นต้น ในฟิล์มที่แห้งแล้วอาจเกิดผลึกของลิพิดหรือเกิดการรวมตัวกันเป็นชั้นของลิพิด ส่งผลให้ฟิล์มบริโกลได้แสดงสมบัติแตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ปริมาณของลิพิดที่ใช้ยังมี

ผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์ม ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีการศึกษาผลของความยาวของสายโซ่ ระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน และความเข้มข้นของกรดไขมันที่ผสมลงในฟิล์มจากสตาร์ช มันสำปะหลังคัดแปรออกทีนิลซัคซิเนตต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลได้ และการเคลือบขนมข้าวอบกรอบอะราเร่

ขนมข้าวอบกรอบอะราเร่(Arare) เป็นขนมขบเคี้ยวขนาดเล็กที่ทำมาจากข้าวเหนียว และมีปัจจัยสำคัญซึ่งมีผลต่อคุณภาพของขนมข้าวอบกรอบ คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ต้องกรอบ แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขนมข้าวอบกรอบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง และมีความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนักแห้ง (สิริกันต์, 2550) การเก็บขนมข้าวอบกรอบเอาไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจึงทำให้ดูความชื้นจากบรรยากาศ เมื่อปริมาณความชื้นของตัวอย่างสูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น (Kulchan และคณะ, 2010) สูญเสียความกรอบ ทำให้เสื่อมคุณภาพเร็วยิ่งขึ้น การนำสารเคลือบบรีโกลได้ที่มีสมบัติในการช่วยลดการแพร่ผ่านของไอน้ำมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบอาหารว่างประเภทกรอบพองสามารถชะลอการสูญเสียความกรอบของผลิตภัณฑ์ได้ (Bravin และคณะ, 2006)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการใช้สตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปรที่มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ ผสมกับลิพิดชนิดและระดับต่างๆ ในการเตรียมสูตรผสมสารเคลือบ

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถของสารเคลือบจากข้อ 1 ในการลดอัตราการดูความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยว

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 ชนิดและปริมาณลิพิดที่เหมาะสมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มบรีโกลได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังคัดแปรออกทีนิลซัคซิเนต

1.3.2 ฟิล์มบรีโกลได้ที่มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำต่ำสามารถใช้เป็นสารเคลือบเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำบนขนมข้าวอบกรอบอะราเร่ได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟิล์มบริโภคนได้ (Edible film)

ฟิล์มบริโภคนได้ (Edible film) คือ การใช้วัสดุที่บริโภคนได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิพิด และส่วนผสมของสารดังกล่าว มาทำเป็นแผ่นบาง นำมาใช้ป้องกันอาหารโดยเคลือบผิวอาหาร โดยตรงหรือเตรียมแผ่นฟิล์มขึ้นมาก่อนแล้วนำมาใช้กับอาหาร มีวัตถุประสงค์เพื่อชะลอการซึมผ่านของก๊าซ ไออน้ำ สารละลาย จุลินทรีย์ และสารอื่นๆ รวมทั้งลดการเสียหายจากการขนส่งโดยคงคุณภาพตลอดอายุการเก็บ เพื่อใช้ในปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลักษณะที่เหมาะสมต่อการใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร (Bertuzzi, 2006)

การเลือกวัตถุดิบในการเตรียมสารละลายฟิล์มบริโภคนได้ มีส่วนสำคัญในการบ่งบอกหน้าที่ของฟิล์มสำหรับห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ วัตถุดิบทางชีวภาพสำหรับผลิตฟิล์มบริโภคนได้สามารถได้แบ่งได้ 4 กลุ่ม (Bourtoom, 2008) คือ

1. ฟิล์มโปรตีน ได้แก่ คอลลาเจน (collagen), เจลาติน (gelatin), โปรตีนข้าวโพด (zein protein), โปรตีนข้าวสาลี (wheat gluten protein), โปรตีนจากเมล็ดพืชน้ำมัน (oilseed protein), โปรตีนนม (milk protein) และ โปรตีนจากแหล่งอื่น ๆ (other protein) เช่น ไข่ขาว (albumin)
2. ฟิล์มและสารเคลือบจากลิพิด ได้แก่ wax, สารลดแรงตึงผิว, เรซิน และกรดไขมัน
3. ฟิล์มโพลีแซคคาไรด์ ได้แก่ แอลจิเนต (alginate), คาราจีแนน (carrageenan), เซลลูโลส (cellulose), เพคติน (pectin), สตาร์ช (starch) และไคโตแซน (chitosan)
4. ฟิล์มประกอบ (composite film) เป็นการใช้สารชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดผสมเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการในการประยุกต์ใช้ เช่น ฟิล์มประกอบที่เกิดจากการรวมกันของโปรตีน โกลบูลินกับกรดไขมัน (Zahedi และคณะ, 2010) และฟิล์มประกอบที่เกิดจากเซลลูโลสกับลิพิด (Ayranci และ Tunc, 2001) ซึ่งสามารถป้องกันการแพร่ผ่านของไออน้ำได้ดีขึ้น การผสมกรดสเตียริกในโปรตีนเวย์ช่วยลดการแพร่ผ่านไออน้ำ แต่ส่งผลให้ค่า Tensile strength ของฟิล์มลดลง (Yoshida และ Antunes, 2004) เป็นต้น

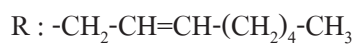
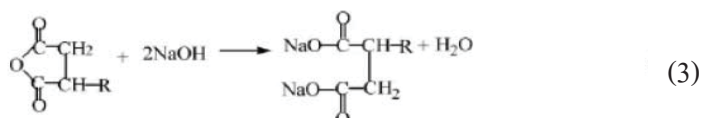
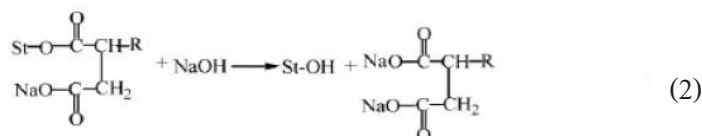
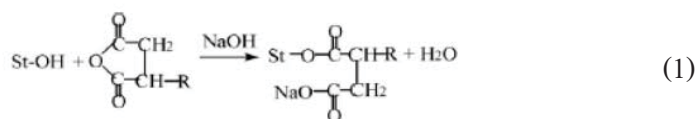
หน้าที่หลักของฟิล์มหรือสารเคลือบผิวบิโกลได้

1. ช่วยปกป้องอาหาร (food protection) โดยฟิล์มหรือสารเคลือบผิวบิโกลได้ มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของสาร (mass transfer barrier) เช่น ด้านการซึมผ่านของไอน้ำ ด้านการซึมผ่านของตัวทำละลาย และด้านต่อแรงที่มากกระทบ โดยจากการศึกษาพบว่าสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปพบว่าฟิล์มจะมีคุณสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านได้เพิ่มมากขึ้นในสถานะที่มีความชื้นสูง

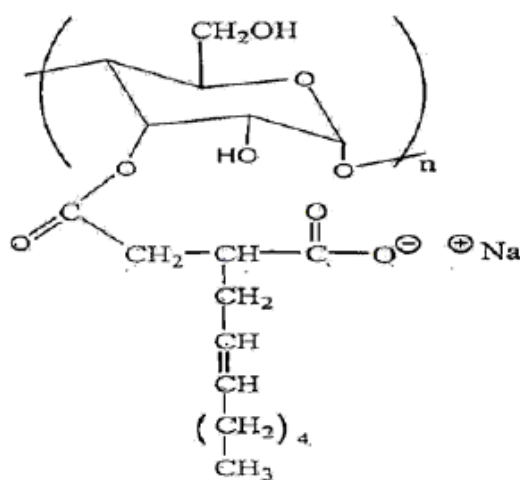
2. ช่วยชะลอการเสื่อมเสียของอาหาร (food preservation) จากปฏิกิริยาต่างๆ เช่น จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากการหายใจ ซึ่งฟิล์มควรจะมีสมบัติในการต้านการซึมผ่านของก๊าซได้ (รัญญาภรณ์, 2540)

2.2 สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต

สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตเป็นการดัดแปรสตาร์ชโดยวิธีเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ด้วยออกทีนิลซัคซิินิกแอนไฮไดรด์ เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสในโมเลกุลด้วยหมู่ออกทีนิล ซัคซิเนต ($-\text{COCH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}_2\text{COOH}$) โดยการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการ (1) ในภาพที่ 1 ในการเกิดปฏิกิริยานั้นสตาร์ชจะกระจายตัวในตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นต่างเพื่อพร้อมในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับออกทีนิลซัคซิินิกแอนไฮไดรด์ ในสถานะต่างต่อไป (Song และคณะ, 2006) ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะมีปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) เกิดขึ้นได้ ดังแสดงในสมการ (2) และ (3) เมื่อมีการดัดแปรจะได้สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต ซึ่งมีสูตร โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียงการตัดแปรรสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต
ที่มา : Song และคณะ (2006)



ภาพที่ 2 สูตร โครงสร้างของโมกุลสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต
ที่มา : Shogren และคณะ (2000)

สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตเป็นสตาร์ชที่ตัดแปรรโดยการแทนที่ (substitution) ดังนั้นจึงเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของสตาร์ชที่เปลี่ยนไปจากสตาร์ชดิบ (native starch) ได้แก่ ความหนืดที่สูงขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลลดในเซชันที่ลดลง การเกิดรีโทรเกรเดชัน

(retrogradation) และการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ที่ลดลง จึงทำให้สตาร์ชชนิดนี้มีความคงตัวต่อสภาวะอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการเข้าแทนที่ของกลุ่มออกทีนิลซัคซิเนต จะช่วยยับยั้งการรวมตัวกันของโมเลกุลอะมิโลส ซึ่งช่วยขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชที่จะมาเกิดพันธะไฮโดรเจน (Bao และคณะ, 2003; Shogren และคณะ, 2000; กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ การมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic property) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic property) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน (Amphiphilic) จึงทำให้มีการใช้งานที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบอิมัลชัน (emulsion), การทำเอนแคปซูลชัน (encapsulation), ฟิล์ม (films) และสารเคลือบ (coatings) และการผลิตเจล (gel production) (Sweedman และคณะ, 2013) เป็นต้น

2.3 ลิพิด

ลิพิดเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดไม่มีขั้ว (apolar) เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซีน เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ และตัวทำละลายที่มีขั้วเล็กน้อย เช่น แอลกอฮอล์ และอะซิโตน ยกเว้นกรดไขมันที่มีน้ำหนักรวมโมเลกุลต่ำ เช่น กรดบิวทิริก จะละลายได้ดีในน้ำ (นิธิยา, 2551)

เนื่องจากลิพิดมีโครงสร้างของโมเลกุลแตกต่างจากโปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ และกรดนิวคลีอิก คือ ไม่ใช่สารประกอบจำพวกพอลิเมอร์ จึงมีโมเลกุลขนาดเล็ก และเกาะตัวกันด้วย non-covalent force โมเลกุลของลิพิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัว (head) คือ ส่วนที่เป็นโพลาร์มีสมบัติเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) หรือละลายได้ในน้ำ ต่ออยู่กับส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีสมบัติเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ดังนั้นเมื่อนำลิพิดไปละลายในน้ำ จึงยึดเกาะกันแบบ non-covalent association นอกจากนี้ยังมีแรงอื่นๆ ได้แก่ van der Waals interaction ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนของโมเลกุล เป็นต้น จากการที่โครงสร้างของโมเลกุลลิพิดมีลักษณะเฉพาะคือ มีทั้งส่วนที่เป็นส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) อยู่ในโมเลกุลจึงเป็นตัวกำหนดสมบัติของลิพิดชนิดนั้นๆ (Nawar, 1996)

ไขมันและน้ำมันเป็นสารประกอบไตรเอสเทอร์ระหว่างกรดไขมันกับกลีเซอรอล เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (หรือไตรเอซิลกลีเซอรอล) พบได้ในผนังเซลล์ของพืชและสัตว์ ไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นของแข็ง (solid) หรือกึ่งของแข็ง (semisolid) ที่อุณหภูมิห้อง จะเรียกว่าไขมัน ส่วนที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง จะเรียกว่า น้ำมัน ไขมันและน้ำมันจะแตกต่างกันที่ชนิดของกรดไขมัน

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์สายตรงที่มีหมู่คาร์บอกซิล 1 หมู่ ในธรรมชาติจะพบกรดไขมันเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ มีจำนวนน้อยมากที่จะพบอยู่ในรูปกรดไขมันอิสระ กรดไขมันสามารถแบ่งกลุ่มออกตามจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (นิธิยา, 2551)

1. กรดไขมันชนิดสายสั้น (short chain fatty acid) คือกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลน้อย เพียง 4-10 อะตอม
2. กรดไขมันชนิดสายกลาง (medium chain fatty acid) มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุล 12-14 อะตอม
3. กรดไขมันชนิดยาว (long chain fatty acid) มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลตั้งแต่ 16 อะตอมขึ้นไป

การสังเคราะห์กรดไขมันในร่างกายจะมีสารเริ่มต้นเป็นหมู่แอซิติล ซึ่งมีคาร์บอนในโมเลกุล 2 อะตอมมาต่อกันเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ทำให้มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันเป็นเลขคู่เสมอ พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของกรดไขมันมีทั้งที่เป็นพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ กรดไขมันที่มีพันธะเดี่ยวทั้งหมดเรียกว่ากรดไขมันชนิดอิ่มตัว ส่วนกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 1 อัน หรือมากกว่า 1 อัน เรียกว่ากรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

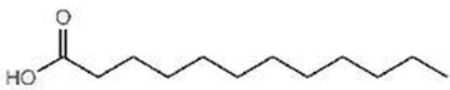
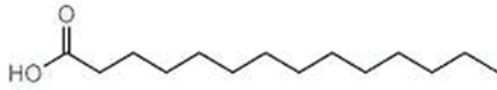

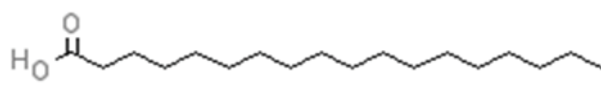
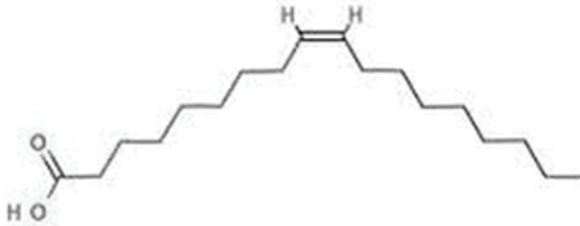
กรดไขมันชนิดอิ่มตัว (Saturated fatty acid) มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n}O_2$ เป็นกรดไขมันที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยว และไม่สามารถรับไฮโดรเจนได้อีก กรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุด ได้แก่ กรดแอซติก (คาร์บอน 2 อะตอม) และกรดบิวทีริก (คาร์บอน 4 อะตอม) เป็นกรดไขมันที่ละลายได้ดีในน้ำและระเหยได้ง่าย กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 6-10 อะตอม ละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย ส่วนกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 12 อะตอมขึ้นไปจะไม่ละลายในน้ำ

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) เป็นกรดไขมันที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลบางตำแหน่งเป็นพันธะคู่ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยๆ ตามจำนวนพันธะคู่ ได้ดังนี้

1. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเพียง 1 อัน (Monounsaturated หรือ Monoethenoid acids) มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n-2}COOH$ ตัวอย่างเช่น กรดโอเลอิก กรดปาล์มิโตเลอิก เป็นต้น
2. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลมากกว่า 1 อัน (Polyunsaturated หรือ Polyethenoid acids) กรดไขมันกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะมีคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล 18-22 อะตอม และมีพันธะคู่ 2-6 อัน (นิธิยา, 2551)

กรดไขมันจะมีสมบัติแตกต่างกันไปตามความยาวของสายโซ่และระดับความไม่อิ่มตัว ได้แก่ โครงสร้างของกรดไขมัน จุดหลอมเหลว (ดังแสดงในตารางที่ 1) และสถานะทางกายภาพที่อุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะความเป็นขี้ ซึ่งมีความโน้มที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันเองของลิพิดในระบบสารละลาย ทำให้มีโครงสร้างของไมเซลล์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นได้กับสารละลายรอบๆ และแรงไฮโดรโฟบิก (Jiménez และคณะ, 2010)

ตารางที่ 1 โครงสร้างและจุดหลอมเหลวของกรดไขมัน

กรดไขมัน	โครงสร้าง ¹	จุดหลอมเหลว ² (°C)
กรดลอริก (Lauric acid)		44.8
กรดไมริสติก (Myristic acid)		54.4
กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid)		62.9
กรดสเตียริก (Stearic acid)		70.1
กรดโอเลอิก (Oleic acid)		16.3

ที่มา: ¹ www.pherobase.com

² นิธิยา (2541)

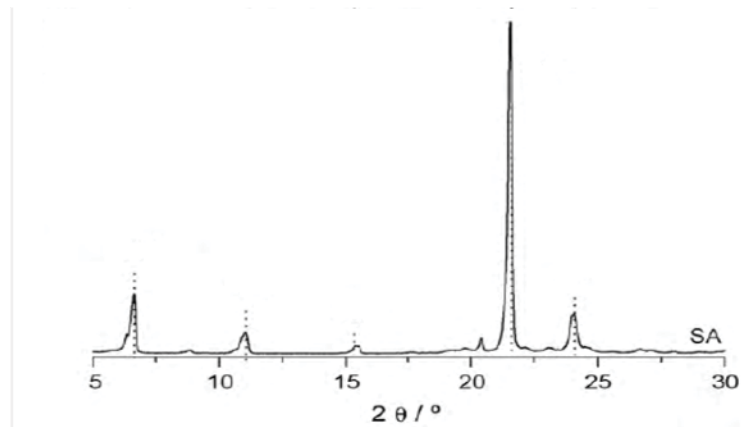
จุดหลอมเหลวที่สูงขึ้นของกรดไขมันอิ่มตัวเป็นผลมาจากรูปร่างโมเลกุลที่มีลักษณะคล้ายแท่ง ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีลักษณะรูปร่างคล้ายส้อมเนื่องจากพันธะคู่ในโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้การจัดเรียงตัวระหว่างโมเลกุลให้เสถียรเป็นระเบียบหรือเกิดเป็นโครงสร้างผลึกตาข่ายนั้นทำได้ยาก (นิธิยา, 2551)

การเกิดผลึกของไขมัน

สำหรับการศึกษาการเกิดผลึกนั้นทำได้หลายวิธี ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ที่นิยมใช้ ได้แก่ การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของผลึกโดยการใช้ภาพถ่ายจาก Polarized light microscopy (PLM) และการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เป็นต้น

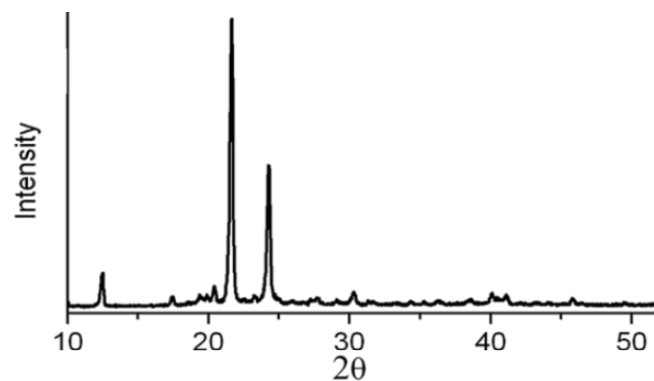
สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านชั้นต่างๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลภายในวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้นแล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่างๆ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุที่เป็นผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึก ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จึงสามารถใช้เป็นตัวชี้บอกได้ว่าสารตัวอย่างนั้น ประกอบด้วยวัสดุที่เป็นผลึกชนิดใดบ้าง โดยนำข้อมูลที่ได้อิงของสารตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานจะทำให้รู้ถึงโครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ (พรรณี, 2554)

ลิวทิดหลายชนิดสามารถเกิดผลึกได้ ซึ่งการเกิดผลึกของไขมันหรือน้ำมันจะเกิดขึ้นในสถานะที่ไขมันหรือผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของไขมันชนิดนั้น ลิวทิดแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกที่แตกต่างกันทำให้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันด้วย เช่น กรดสเตียริกบริสุทธิ์มีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 7, 11, 20, 22 และ 24° (Teixeira และคณะ, 2010) ดังแสดงในภาพที่ 3 ในขณะที่กรดปาล์ม-มิติกบริสุทธิ์มีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 12.5, 22.6 และ 24.3° (Fang และคณะ, 2012) ดังแสดงในภาพที่ 4 เป็นต้น



ภาพที่ 3 X-ray diffraction patterns ของกรดสเตียริก

ที่มา: Teixeira และคณะ (2010)



ภาพที่ 4 X-ray diffraction patterns ของกรดปาล์มมิติก

ที่มา: Fang และคณะ (2012)

ในฟิล์มบริโกลได้ โครงสร้างผลึกหรือการจัดเรียงตัวของผลึกของลิพิดภายในฟิล์มนั้นมีบทบาทสำคัญ คือหากผลึกของลิพิดมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นจะส่งผลให้ฟิล์มบริโกลได้นั้นมีความสามารถในการต้านทานการแพร่ผ่านของแก๊สและไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีผลึกของลิพิดที่จัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ นอกจากนี้ถ้าลิพิดมีสถานะเป็นของเหลวมากกว่าของแข็งจะทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อการแพร่ผ่านของแก๊สและไอน้ำต่ำกว่าลิพิดที่มีสถานะเป็นของแข็ง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของลิพิดเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่า ทำให้สมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านลดลง (Krochta และคณะ, 1994) ความเข้ากันได้หรือความแตกต่างของความเป็นขั้วระหว่างเฟสต่อเนื่องกับเฟสกระจายตัวมีความสำคัญต่อสมบัติการเป็นตัว

ขัดขวางไอน้ำของฟิล์ม โดยถ้ามีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสต่อเนื่องกับเฟสกระจายตัวต่ำจะทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์มลดลง (Martin-Polo และคณะ, 1992)

2.4 ฟิล์มประกอบ

ฟิล์มประกอบเป็นฟิล์มที่รวมข้อดีขององค์ประกอบที่เป็นลิพิดและไฮโดรคอลลอยด์เข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วจะลดข้อด้อยของแต่ละองค์ประกอบลง โดยลิพิดสามารถขึ้นรูปอยู่ในไฮโดรคอลลอยด์เมทริกซ์ได้ เป็นลักษณะของ bilayer film หรือกระจายตัวในเมทริกซ์ เป็นลักษณะของ emulsified film ซึ่ง emulsified film จะมีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่า bilayer film เนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคไม่เป็น homogeneous (ขนาดไม่สม่ำเสมอ) แต่ emulsified film แสดงสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า สามารถทำได้ในขั้นตอนเดียว ในขณะที่ multilayer film ใช้หนึ่งขั้นตอนต่อหนึ่ง layer อย่างไรก็ตามลักษณะของอิมัลชันที่ใช้เตรียมฟิล์มก็มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการเป็นตัวขัดขวางไอน้ำของ emulsified film คือ ถ้ามีการกระจายของขนาดอนุภาคไขมันที่เล็กกว่าและมีขนาดเท่าๆกัน จะมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง (Karbowski และคณะ, 2007)

กรดไขมันมีการศึกษาในฟิล์มประกอบจากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ สตาร์ช (Jiménez และคณะ, 2012), hydroxypropyl -methylcellulose (HPMC) (Tarazaga และคณะ, 2008; Jiménez และคณะ, 2010), carboxy methyl cellulose (CMC) (Ghanbarzadeh และ Almasi, 2011) และ Kefiran (Ghasemlou และคณะ, 2011) โดยพบว่าชนิดและปริมาณของกรดไขมันมีผลต่อสมบัติของฟิล์มแตกต่างกันตามองค์ประกอบที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม โดยในด้านชนิดของกรดไขมันนั้นมีผลต่อสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าการผสมกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (กรดสเตียริก, กรดปาล์มมิติก) สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ใกล้เคียงกันและดีกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว (กรดโอเลอิก) ในฟิล์มจากสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องจากกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติกมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรง (ดังแสดงในตารางที่ 1) จึงสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ในขณะที่โครงสร้างโมเลกุลของกรดโอเลอิกไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากพันธะคู่ (ดังแสดงในตารางที่ 1) ทำให้รวมตัวกับส่วนที่เป็นเกลียวของอะไมโลสได้ยาก นอกจากนี้การที่กรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติกมีสถานะเป็นของแข็ง ณ ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจสอบ (25 °C) ทำให้สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีกว่ากรดโอเลอิก (Jiménez และคณะ, 2012) ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจาก hydroxypropyl -methylcellulose (HPMC) ที่มีการผสมกรดสเตียริกกลับมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีการผสมกรดปาล์มมิติกหรือกรดโอเลอิก เนื่องจาก hydroxypropyl -methylcellulose (HPMC) มีความหนืดสูง มีผลต่อ

ความเร็วในการโตของไมเซลล์ของกรดไขมันทำให้โมเลกุลของกรดไขมันที่มีขนาดใหญ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ไมเซลล์ของกรดสเตียริกจึงมีขนาดเล็กกว่ากรดปาล์มมิติก ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำจึงต่ำกว่า ส่วนกรดโอเลอิกนั้นมีความเป็นขี้เล็กน้อยทำให้มีค่าความเข้มข้นวิกฤตที่ทำให้เกิดลักษณะไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration; CMC) ต่ำ กลุ่มของลิพิดที่มาเกาะกันจึงมีขนาดเล็ก เมื่อไมเซลล์มีขนาดเล็กความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำจึงต่ำกว่ากรดปาล์มมิติก (Jiménez และคณะ, 2010) ดังแสดงในตารางที่ 2 และสำหรับฟิล์มที่เตรียมจาก hydroxypropyl -methylcellulose (HPMC) – Beeswax พบว่าฟิล์มที่มีการผสมกรดโอเลอิกจะมีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุดเนื่องจากการแยกชั้นของกรดโอเลอิกในระบบ hydroxypropyl -methylcellulose (HPMC) – Beeswax เป็นแบบ Bilayer ทำให้เกิด lipid enrich layer หันส่วนที่ไม่ชอบน้ำไปทางด้านที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านได้น้อยลง ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำในฟิล์มจึงลดลง แต่ในฟิล์มที่ผสมกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติกนั้นเข้ากันได้ดีกับ Beeswax ไม่เกิดลักษณะ Bilayer (Tarazaga และคณะ, 2008) และนอกจากชนิดของกรดไขมันที่มีผลต่อค่าการซึมผ่านของไอน้ำแล้วความเข้มข้นของกรดไขมันยังมีผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำด้วย โดยพบว่าเมื่อผสมกรดโอเลอิกในฟิล์มจาก carboxyl methyl cellulose (CMC) ที่ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง เนื่องจากความเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่เพิ่มขึ้นภายในฟิล์ม (Ghanbarzadeh และ Almasi, 2011) แต่เมื่อผสมกรดโอเลอิกที่ระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในฟิล์มจาก kefiran กลับไม่ทำให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำแตกต่างกัน (Ghasemlou และคณะ, 2011) ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในฟิล์มจากพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน กรดไขมันต่างชนิดกันจะมีผลต่อสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ระหว่างกรดไขมันกับพอลิเมอร์อันเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน และความเป็นขี้ของกรดไขมันและพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสถานะของกรดไขมัน และความหนืดของพอลิเมอร์

ในด้านผลของชนิดของกรดไขมันต่อความแข็งแรงของแผ่นฟิล์ม พบว่า ฟิล์มจากสตาร์ชที่ผสมกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (กรดโอเลอิก) จะมีค่า Tensile strength ต่ำกว่า มีค่า %Elongation at break สูงกว่าฟิล์มจากสตาร์ชที่ผสมกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (กรดสเตียริก, กรดปาล์มมิติก) แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มจากสตาร์ชที่ผสมกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า และสามารถยืดตัวได้มากกว่าฟิล์มจากสตาร์ชที่ผสมกรดไขมันชนิดอิ่มตัว และเมื่อความยาวของสายโซ่กรดไขมันเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มว่าฟิล์มจะมีความแข็งแรงมากขึ้นและยืดตัวได้น้อยลง (Jiménez และคณะ, 2012) ส่วนฟิล์มจาก hydroxypropyl -methylcellulose (HPMC) ที่มีการผสมกรดไขมันซึ่งมีความยาวของสายโซ่กรดไขมันเพิ่มขึ้น ค่า Tensile strength, %Elongation at break และ Elastic modulus ไม่

แตกต่างกัน และเมื่อใช้กรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว เปรียบเทียบกับกรดไขมันอิ่มตัว พบว่า ฟิล์มกลับมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมาก สามารถยืดตัวได้มาก และมีค่า Elastic modulus ลดลง (Jiménez และคณะ, 2010) ดังแสดงในตารางที่ 3 ในส่วนของความเข้มข้นของกรดไขมันต่อความแข็งแรงของฟิล์ม ระดับความเข้มข้นของกรดโอเลอิกที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงลดลงและยืดตัวได้มากขึ้น และค่า Elastic modulus ลดลง (Ghanbarzadeh และ Almasi, 2011) แต่ไม่ทำให้ค่า Tensile strength ของฟิล์มจาก kefirin แตกต่างกัน แต่ค่า %Elongation at break ของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น (Ghasemlou และคณะ, 2011)

ตารางที่ 2 ผลของชนิดและความเข้มข้นของกัฟิติดต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

ฟิล์ม	สภาวะการทำแห้งฟิล์ม	สภาวะการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์นอก และในถ้วย	ค่าการซึมผ่านไอน้ำ	แหล่งอ้างอิง
corn starch	20°C, 45% RH, 60 h	25°C, 53% RH, 100% RH	7.9 ± 0.2^a (gmm/kPa h m ²)	Jiménez และคณะ (2012)
corn starch-PA(1:0.15)	20°C, 45% RH, 60 h	25°C, 53% RH, 100% RH	5.9 ± 0.6^b (gmm/kPa h m ²)	
corn starch-SA(1:0.15)	20°C, 45% RH, 60 h	25°C, 53% RH, 100% RH	5.8 ± 0.3^b (gmm/kPa h m ²)	
corn starch-OA(1:0.15)	20°C, 45% RH, 60 h	25°C, 53% RH, 100% RH	7.2 ± 0.9^c (gmm/kPa h m ²)	
CMC	60°C	25°C, 97% RH, 0% RH	2.31 ± 0.22^a ($\times 10^{-5}$) (g/day m Pa)	Ghanbarzadeh และ Almasi (2011)
CMC-OA (30%)	60°C	25°C, 97% RH, 0% RH	2.00 ± 0.19^b ($\times 10^{-5}$) (g/day m Pa)	
CMC-OA (60%)	60°C	25°C, 97% RH, 0% RH	1.61 ± 0.34^c ($\times 10^{-5}$) (g/day m Pa)	
CMC-OA (80%)	60°C	25°C, 97% RH, 0% RH	1.53 ± 0.40^c ($\times 10^{-5}$) (g/day m Pa)	

ตารางที่ 2 (ต่อ) ผลของชนิดและความเข้มข้นของลิพิดต่อความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

ฟิล์ม	สภาวะการทำแห้งฟิล์ม	สภาวะการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์นอก และในถ้วย	ค่าการซึมผ่านไอน้ำ	แหล่งอ้างอิง
kefiran	25°C, 50% RH, 72 h	25°C, 75% RH, 0%RH	$5.56^a (\times 10^{-11} \text{ g/m s Pa})$	Ghasemlou และคณะ (2011)
kefiran-OA(1:0.15)	25°C, 50% RH, 72 h	25°C, 75% RH, 0%RH	$3.95^b (\times 10^{-11} \text{ g/m s Pa})$	
kefiran-OA(1:0.25)	25°C, 50% RH, 72 h	25°C, 75% RH, 0%RH	$3.92^b (\times 10^{-11} \text{ g/m s Pa})$	
kefiran-OA(1:0.35)	25°C, 50% RH, 72 h	25°C, 75% RH, 0%RH	$3.85^b (\times 10^{-11} \text{ g/m s Pa})$	
PGP	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$96.203 \pm 7.33^a (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	Zahedi และคณะ (2010)
PGP-PA(2%)	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$60.706 \pm 2.34^b (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	
PGP-PA(4%)	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$58.903 \pm 1.51^b (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	
PGP-PA(6%)	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$57.302 \pm 1.52^b (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	
PGP-SA(2%)	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$59.1 \pm 3.36^b (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	
PGP-SA(4%)	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$56.74 \pm 1.32^b (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	
PGP-SA(6%)	40 h	22±1°C, 97%RH, 0%RH	$55.497 \pm 6.09^b (\text{g mm/m}^2 \text{ kPa d})$	

^{a,b,c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งของแต่ละแหล่งอ้างอิงแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

CMC = Carboxymethyl cellulose, PGP = Pistachio globulin protein, OA = Oleic acid, PA = Palmitic acid, SA = Stearic acid

ตารางที่ 3 ผลของชนิดและความเข้มข้นของลิพิดต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ฟิล์ม	สภาวะการทำแห้งฟิล์ม	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	Elastic modulus (MPa)	แหล่งอ้างอิง
corn starch	20°C, 45% RH, 60 h	9.2 ±0.6 ^a	8 ±4 ^a	800 ±70 ^a	Jiménez และคณะ (2012)
corn starch-PA(1:0.15)	20°C, 45% RH, 60 h	6.8 ±0.3 ^b	4 ±3 ^{ab}	640 ±110 ^b	
corn starch-SA(1:0.15)	20°C, 45% RH, 60 h	8.3 ±1.3 ^{ab}	2.2 ±0.7 ^b	870 ±170 ^a	
corn starch-OA(1:0.15)	20°C, 45% RH, 60 h	3.3 ±0.3 ^c	13 ±7 ^c	170 ±30 ^c	
HPMC	20°C, 45% RH, 48 h	55 ±5 ^a	7 ±2 ^a	25.5 ±5 ^a	Jiménez และคณะ (2010)
HPMC-PA (1:0.15)	20°C, 45% RH, 48 h	33 ±3 ^b	3 ±1 ^b	19.3 ±12 ^c	
HPMC-SA (1:0.15)	20°C, 45% RH, 48 h	34 ±3 ^b	4 ±1 ^b	18.7 ±20 ^c	
HPMC-OA (1:0.15)	20°C, 45% RH, 48 h	46 ±7 ^c	14 ±3 ^c	16.8 ±8 ^b	

ตารางที่ 3 (ต่อ) ผลของชนิดและความเข้มข้นของกัฟิติดต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ฟิล์ม	สภาวะการทำแห้งฟิล์ม	Tensile strength (MPa)	%Elongation at break	Elastic modulus (MPa)	แหล่งอ้างอิง
CMC	60°C	4.82 ± 0.34 ^a	27.71 ± 2.01 ^{ab}	77.74 ± 3.57 ^a	Ghanbarzadeh และ
CMC-OA (30%)	60°C	4.70 ± 0.54 ^a	34.08 ± 6.45 ^b	97.96 ± 2.26 ^a	Almasi (2001)
CMC-OA (60%)	60°C	4.76 ± 0.20 ^a	78.09 ± 5.94 ^c	22.19 ± 4.33 ^a	
CMC-OA (80%)	60°C	4.48 ± 0.50 ^a	79.95 ± 5.48 ^c	16.54 ± 3.54 ^a	

^{a,b,c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งของแต่ละแหล่งอ้างอิงแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

HPMC = Hydroxypropyl methyl cellulose

CMC = Carboxymethyl cellulose

OA = Oleic acid

PA = Palmitic acid

SA = Stearic acid

2.5 การประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวบริเวณได้ในผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง

ผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง เป็นอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำ การเก็บรักษาไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องทำให้อาหารดูดซับความชื้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นุ่มลงได้ (Labuza และ Hyman, 1998) โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของอาหารที่อยู่ในสภาวะของแข็งคล้ายแก้วที่มีลักษณะกรอบเปราะ ไปเป็นของแข็งคล้ายยาง ที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และหากมีโครงสร้างเป็น โพรงอากาศอยู่ด้วยจะดูดซับความชื้นเร็วยิ่งขึ้น ปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวบริเวณได้เคลือบลงบนผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยลดอัตราการแพร่ผ่านของความชื้นจากสภาวะแวดล้อมสู่ผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง ได้แก่ การเคลือบแครกเกอร์ (Bravin และคณะ, 2006) การเคลือบขนมข้าวอบกรอบ (สิริกันต์, 2553) ผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอด (Usawakesmanee และคณะ, 2008) เป็นต้น

ค่าวอเตอร์แอกติวิตีของระบบอาหารจะสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นของอาหารซึ่งสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ ณ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความสัมพันธ์นี้จะจำเพาะกับอาหารแต่ละชนิด เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับน้ำ (moisture sorption isotherm) หรือซอร์ปชัน ไอโซเทอม ซึ่งจะอธิบายปริมาณการดูดซับ (adsorption)/ คายซับ (desorption) น้ำของอาหาร ณ สมดุล ซึ่งทราบค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่อุณหภูมิคงที่ (Bell และ Labuza, 2000) ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้ซอร์ปชัน ไอโซเทอมในกระบวนการผลิตและการศึกษาความคงตัวของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ในการศึกษาอายุการเก็บรักษาสามารถใช้ไอโซเทอมในการหาค่าวอเตอร์แอกติวิตีและปริมาณความชื้นที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และช่วยในการทำนายความคงตัว ความคงตัวทางเคมีและกายภาพของอาหารเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหาร การใช้ประโยชน์ของไอโซเทอมในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใช้ในการกำหนดส่วนผสมของอาหาร เพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างส่วนผสม หรือใช้ในการเลือกส่วนผสมเพื่อเปลี่ยนค่าวอเตอร์แอกติวิตี ในส่วนของกระบวนการผลิตมีการใช้ไอโซเทอมเพื่อศึกษาและควบคุมความเข้มข้นและกระบวนการทำแห้ง นอกจากนี้ไอโซเทอมยังมีความสำคัญต่อด้านบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากไอโซเทอมสามารถช่วยกำหนดสมบัติด้านการขัดขวางความชื้น โดยการเลือกใช้วัสดุที่มีการจำกัดการได้รับหรือสูญเสียความชื้น (Damodaran, 2008)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายซอร์ปชัน ไอโซเทอมใช้ในการทำนายค่าความชื้นวิกฤติและการเปลี่ยนแปลงของอาหาร ประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัวแปรหรือมากกว่า ได้แก่

1. แบบจำลองของ Brunauer-Emmett-Teller (BET model) เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นระดับชั้น โมโนเลเยอร์อย่างง่ายและเหมาะสมในการใช้ทำนายซอร์ปชัน ไอโซเทอมในช่วงวอเตอร์แอกติวิตี 0 - 0.5 (Yu, 2007)

$$\frac{a_w}{(1-a_w)m} = \frac{1}{m_0} + \left[\frac{c-1}{m_0 c}\right] a_w$$

เมื่อ m_0 คือ ปริมาณความชื้นระดับชั้นโมโนเลเยอร์

C คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

2. แบบจำลองของ Guggenheim, Anderson และ de Boer (GAB model) เป็นสมการที่สามารถใช้ทำนายซอร์ปชันไอโซเทอมในช่วงวอเตอร์แอกติวิตี้ตั้งแต่ 0 – 0.95 (Labuza และ Altunakar, 2007)

$$m_0 = \frac{m_0 k_b c a_w}{[1 - k_b a_w][1 - k_b a_w + c k_b a_w]}$$

เมื่อ m คือ ปริมาณความชื้น

m_0 คือ ปริมาณความชื้นระดับชั้นโมโนเลเยอร์

k_b และ c คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

3. แบบจำลองของ Smith เป็นแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง (empirical model) ใช้อธิบายส่วนโค้งสุดท้ายของซอร์ปชันไอโซเทอมของไบโอพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

$$m = a + b \log(1 - a_w)$$

เมื่อ m คือ ปริมาณความชื้น

a และ b คือ ค่าคงที่ โดย a เป็นจุดตัดแกนปริมาณความชื้น (แกน y) ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้ในโมโนเลเยอร์ และ b คือ ความชันของซอร์ปชันไอโซเทอมของความชื้นส่วนที่เป็นมัลติเลเยอร์

Labuza และ Altunakar (2007) ได้สรุปวิธีการหาซอร์ปชันไอโซเทอมออกเป็น 2 วิธี คือ

1) ตัวอย่างอาหารถูกวางไว้ในภาชนะที่มีการควบคุมความชื้นที่อุณหภูมิคงที่และวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจนกระทั่งถึงจุดสมดุล ได้แก่ วิธีสารละลายเกลืออิ่มตัว (saturated salt slurry method) และเครื่องมือสร้างความชื้นแบบ Dynamic Vapor Sorption (DVS)

2) ชุดของตัวอย่างที่มีการปรับเปลี่ยนความชื้นแตกต่างกัน โดยการเพิ่มหรือกำจัดความชื้นออก จากนั้นวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และปริมาณน้ำ ได้แก่ เครื่องมือสร้างความชื้นแบบ Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI)

วิธีสารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Slurry Method)

วิธีสารละลายเกลืออิ่มตัว เป็นวิธีมาตรฐานที่มีการปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์จำเพาะใน ภาชนะปิด โดยการใส่สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ทราบค่าความชื้นสัมพัทธ์ในการทำให้ตัวอย่างเข้าสู่ สมดุลกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Lewicki และ Pomaranska-Lazuka, 2003) โดยผลึกของเกลือจะทำ หน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ กล่าวคือ เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่างสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายใน ภาชนะปิด จะมีการเคลื่อนที่ของความชื้นออกจากตัวอย่าง และถูกดูดซับไว้โดยผลึกเกลือทำให้ น้ำหนักของตัวอย่างลดลง ในทางกลับกันหากวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ ภายในภาชนะจะเกิดการตกผลึกเกลือเนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นเข้าสู่ตัวอย่างทำให้ ตัวอย่างมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น หลังจากผ่านระยะเวลาช่วงหนึ่ง การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่าง สารละลายเกลืออิ่มตัวกับตัวอย่างจะเข้าสู่สมดุลและไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างอีก (Penner, 2013) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (Labuza, 1984)

วิธีนี้สามารถทำได้หลายตัวอย่างพร้อมกัน และมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อเสียคือ 1) ใช้ ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 2) ยากที่จะทำการวัดค่าได้อย่างถูกต้องเนื่องจากการเคลื่อนย้าย ตัวอย่างและตัวอย่างมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ แตกต่างจากภายในภาชนะปิด 3) ใช้ตัวอย่างปริมาณมาก และ 4) ใช้เวลานานและมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก เนื่องจากต้องมีการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างในช่วงที่ตัวอย่างอยู่ในสภาวะสมดุล (Levoguer และ Williams, 1997) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเจริญของเชื้อราบนตัวอย่างที่มีการเก็บไว้ในสารละลาย เกลือที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเป็นเวลานานกว่าจะเข้าสู่สมดุล (Snow, 1949 และ Beuchat, 1983)

เครื่องมือสร้างความชื้น (Humidity Generating Instrument)

จากข้อเสียของวิธีสารละลายเกลืออิ่มตัวข้างต้นนำมาสู่การใช้เครื่องมือสร้างความชื้น โดย เครื่องมือเหล่านี้สามารถสร้างซอร์ปชันไอโซเทอมได้ในระยะเวลาสั้นโดยใช้เทคโนโลยีการไหล ผู้วิจัยสามารถเลือกใช้ความชื้นสัมพัทธ์หรือชุดของความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการได้ ด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ ความชื้นสัมพัทธ์จะถูกควบคุมอัตโนมัติด้วยเครื่องควบคุมการไหลของมวล อากาศ แห้งและอากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะผสมกันในสัดส่วนที่ทำให้ได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการ ตัวอย่างจะอยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่ควบคุมนี้และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงด้วย เครื่องชั่งดิจิทัลที่คงที่และมีความไวสูง เครื่องมือนี้จะถูกตั้งโปรแกรมให้มีการเปลี่ยนระดับ

ความชื้นสัมพัทธ์โดยอัตโนมัติ และหยุดนิ่งเมื่อมีค่าความชื้นคงที่ในแต่ละระดับจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล (Penner, 2013) เครื่องมือเหล่านี้จะใช้กลยุทธ์ที่เรียกว่า dm/dt (ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในหนึ่งหน่วยเวลา) เพื่อกำหนดการไปถึงสภาวะสมดุล โดยเมื่อ dm/dt มีค่าเข้าใกล้ 0 ตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงมวลน้อยมาก ซึ่งหมายถึงการเข้าสู่สมดุลของปริมาณความชื้น (Yu, 2007) เครื่องมือสร้างความชื้น ได้แก่

1. Dynamic Vapor Sorption (DVS) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เครื่องชั่งที่มีความไวสูงเป็นพิเศษ (ultra-sensitive microbalance) ซึ่งจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงมวลของตัวอย่างตลอดเวลาที่มีการดูดซับ/คายซับความชื้น ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการหาซอร์ปชันไอโซเทอมจากสัปดาห์หรือเดือน เป็นเพียงชั่วโมงหรือวัน (Yu, 2007) ใช้ตัวอย่างขนาดเล็ก และปริมาณน้อยจึงใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลนั้นเร็วกว่าวิธีสารละลายเกลืออิ่มตัวถึง 10-100 เท่า เครื่องนี้ใช้ระบบอัตโนมัติแบบเต็มรูปแบบและใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมจึงลดการใช้แรงงานคนและรักษาภาวะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของตัวอย่างได้ตลอดช่วงของการทดลองทำให้มีความแม่นยำสูง (Levoguer และ Williams, 1997)

2. Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) ทั้งวิธีสารละลายเกลืออิ่มตัวและ DVS ล้วนเป็นวิธีในการหาซอร์ปชันไอโซเทอมแบบเข้าสู่สมดุล ส่วนการหาซอร์ปชันไอโซเทอมด้วยวิธี DDI นั้นตัวอย่างไม่ต้องอยู่ในสภาวะสมดุล และไม่ต้องควบคุมค่า %RH ของอากาศที่จะสัมผัสกับตัวอย่าง แต่ในการศึกษาการดูดซับความชื้นของตัวอย่างนั้นจะมีการเตรียมอากาศให้อิ่มตัวไปด้วยไอน้ำก่อนที่จะปล่อยให้เข้าสู่เดสิคเคเตอร์ที่มีตัวอย่างวางอยู่ และจะเกิดการดูดซับความชื้นของตัวอย่างขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ส่วนการศึกษาการคายซับของตัวอย่างนั้นจะใช้การผ่านอากาศที่ผ่านสารดูดความชื้น (desiccant) เข้าสู่เดสิคเคเตอร์ที่มีตัวอย่างอยู่ และจะเกิดการคายซับความชื้นของตัวอย่างขึ้น ซึ่งการศึกษาการดูดซับหรือคายซับนั้นจะขึ้นอยู่กับทางเลือกค่าวอเตอร์แอกติวิตีสุดท้าย (0.03-0.95) และอัตราการไหลของอากาศ (10-1000 ml/min) หลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 0.015) จะหยุดการไหลของอากาศ จากนั้นวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่างโดยใช้ chilled mirror dew point sensor และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วย magnetic force balance ก่อนที่ตัวอย่างจะเข้าสู่สมดุล จากนั้นจึงคำนวณความชื้นของตัวอย่างจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (ต้องทราบน้ำหนักและความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างก่อน) (Schmidt และ Lee, 2012) สำหรับการหาซอร์ปชันไอโซเทอมด้วยวิธี DDI นั้นจะได้จำนวนข้อมูลที่มากกว่าและใช้เวลาน้อยกว่าวิธีเข้าสู่สมดุล แต่จะมีความคล้ายกันคือ การขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวอย่าง, อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำเข้าหรือออกจากตัวอย่าง และลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของตัวอย่าง แต่

เนื่องด้วยธรรมชาติของระบบไดนามิกส์ ทำให้ในบางครั้งปริมาณความชื้นไม่ใช่ปริมาณความชื้นที่สมคูลอย่างแท้จริง นอกจากนี้ซอร์ปชันไอโซเทอมที่ได้จากวิธี DDI นั้นตรงกันกับลักษณะสภาวะจริงของตัวอย่าง จึงใช้ในการตรวจสอบ glass transition, การเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization), รูปแบบการไฮเดรต เป็นต้น (Schmidt และ Lee, 2012)

เครื่องมือสร้างความชื้น แบบ Dynamic Vapor Sorption (DVS) และ Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) มีการใช้งานและการใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน ข้อมูลบางอย่างอาจได้จากวิธี Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) โดยที่วิธี Dynamic Vapor Sorption (DVS) ไม่สามารถทำได้ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของซอร์ปชันไอโซเทอมที่สัมพันธ์กันกับการเปลี่ยนแปลงของเมทริกซ์ เช่น glass transition ซึ่งค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติ (critical water activity) ของการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะของแข็งคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นของแข็งคล้ายยาง (rubbery state) เป็นต้น (Penner, 2013)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

3.1.1 สตาร์ชออกทีนิล ซัคซิเนต เตรียมในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 ซอร์บิทอล (70% solution) จากบริษัทสยามซอร์บิทอล จำกัด จังหวัด
กรุงเทพมหานคร

3.1.3 ขนมห้าวอบกรอบ จากโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดสมุทรปราการ

3.2 สารเคมี

3.2.1 กรดโอเลอิก จากบริษัท Sigma-Aldrich, Germany

3.2.2 กรดสเตียริก จากบริษัท Sigma-Aldrich, Germany

3.2.3 กรดปาล์มมิติก จากบริษัท Sigma-Aldrich, Germany

3.2.4 กลีเซอรีนไฮดรอกซีแอตเตต จากบริษัท Ajax Finechem จำกัด, Australia

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเตรียมฟิล์มบริโกลได้

- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง (รุ่น KERN & Sohn GmbH D-72336,
Balingen, Germany)

- เทอร์โมมิเตอร์ (รุ่น TBT-08H, China)

- เครื่องปั่นความเร็วสูง (High speed blender), ยี่ห้อ Moulinex

- เครื่องกำจัดฟองอากาศ (รุ่น 275DAE, ยี่ห้อ CREST, New York)

- เครื่อง Homogenizer (รุ่น Lab2000, ยี่ห้อ APV, UK)

3.3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติฟิล์มบริโกลได้

- Hand dial thickness gauge (รุ่น 7326, Mitutoyo, Japan)

- Scanning Electron Microscope (รุ่น JSA-541QLV, JEOL, Tokyo)

- Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy (รุ่น Spectrum 100 FT-IR,
Perkin Elmer, USA)

- เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Model TA-XT2i, Stable Micro System, UK) พร้อมหัววัดเนื้อสัมผัสชนิด Tensile Grip (รหัส 11356)
- เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) (รุ่น MiniflexII, Rigaku, Japan)
- เครื่องควบคุมสภาวะแวดล้อม (Climatic test cabinet, รุ่น TK120, Nuve, Turkey)
- เครื่องวัดสี (Hunter Lab, model miniscan XE, USA)

3.3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับเตรียมและทดสอบการใช้สารเคลือบ

- เครื่องเคลือบขนม (Shin Denyo Electric Blower)
- เครื่องมือวิเคราะห์ Sorption Isotherm (Vapor sorption analyzer, AquaLab VSA, USA)
- เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Model TA-XT2i, Stable Micro System, UK) พร้อมหัววัดเนื้อสัมผัสชนิด Cylinder probe เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณลิกพิดต่อสมบัติของอิมัลชันและสมบัติของฟิล์มบริโกลได้

3.4.1.1 วิธีการเตรียมฟิล์มบริโกลได้

เตรียมอิมัลชัน โดยสูตรอิมัลชันประกอบด้วยสตาร์ชตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนต, Non-Crystallizing sorbitol 40 %(total solid) ลิพิด 3 ชนิด (กรดปาล์มมิติก, กรดสเตียริก และกรดโอเลอิก) และน้ำกลั่น โดยแปรอัตราส่วนของลิกพิดต่อสตาร์ชตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนต 3 ระดับ คือ 0:1, 0.1:1 และ 0.2:1 แสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก(1.1) โดยสารละลายทั้งหมดมีน้ำหนัก 700 กรัม แสดงรายละเอียดการเตรียมในภาคผนวก ก(1.2) นำอิมัลชันที่เตรียมได้เทลงบนเพลทพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ทำให้แห้งในห้องที่สภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ± 5 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างฟิล์มที่แห้งแล้วไปเก็บรักษาในตู้เดลิคเตออร์ที่มีสารละลายเมกนีเซียมไนเตรดอิ่มตัว ณ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 53 ± 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติของฟิล์ม

3.4.1.2 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบริโกลได้ประเภทอิมัลชัน

- ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (รุ่นJSA-541QLV) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข
- หมู่ฟังก์ชันในฟิล์มทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Model TAXT2i, Stable Micro System, UK) ตามวิธีของ Romeo-bastida และคณะ (2005) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ศึกษาผลึกภายในฟิล์ม โดยใช้ X-ray diffraction ตามวิธีของ Jiménez และคณะ (2012) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ โดยดัดแปลงวิธีจาก Wittaya (2009) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ความขุ่นของแผ่นฟิล์ม ทดสอบด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab, model Miniscan XE, USA) โดยใช้แบบ Day light (D65) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

3.4.2 การศึกษาผลของสารเคลือบจากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรออกทีนิลซัคซิเนตและลิพิดต่อคุณภาพของขนมข้าวอบกรอบ

เตรียมสารเคลือบโดยแปรชนิดของลิพิด 2 ชนิด โดยเลือกใช้สารเคลือบอัตราส่วนของลิพิดต่อสตาร์ชดัดแปรออกทีนิลซัคซิเนต 0.2:1 เปรียบเทียบตัวอย่างที่เคลือบด้วยสารเคลือบไม่ผสมลิพิด แสดงรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ก โดยสารละลายทั้งหมดมีน้ำหนัก 500 กรัม แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก จากนั้นตรวจสอบสมบัติของขนมข้าวอบกรอบ ดังต่อไปนี้

- ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของขนมข้าวอบกรอบด้วยเครื่อง Vapor Sorption Analyzer ระบบ Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ปริมาตรจำเพาะ ตามวิธีของ Lacaze และคณะ (2007) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนผลิตภัณฑ์ ตามวิธีของ Hamada และคณะ (2005) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของขนมข้าวอบกรอบก่อนและหลังเคลือบสารเคลือบ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

- ลักษณะเนื้อสัมผัส ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Model TAXiII, Tex Tech Corp, USA) แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

- ทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาด้วยวิธี General Quantitative Descriptive analysis โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน ตามวิธีของ Chaiyakul และคณะ (2008)

3.5 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3.5.1 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณลิพิดต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรออกทีนิลซัคซิเนต วางแผนการทดลองแบบ 3×2 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) with 1 control และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD (Least Significant difference) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.5.2 การศึกษาผลของสารเคลือบจากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรออกทีนิลซัคซิเนตและลิพิดต่อคุณภาพของขนมอบกรอบวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) และการทดสอบทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Completely Block Design, RCBD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD (Least Significant difference) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลของชนิดและปริมาณลิวตินต่อสมบัติของฟิล์มบรีโกลได้

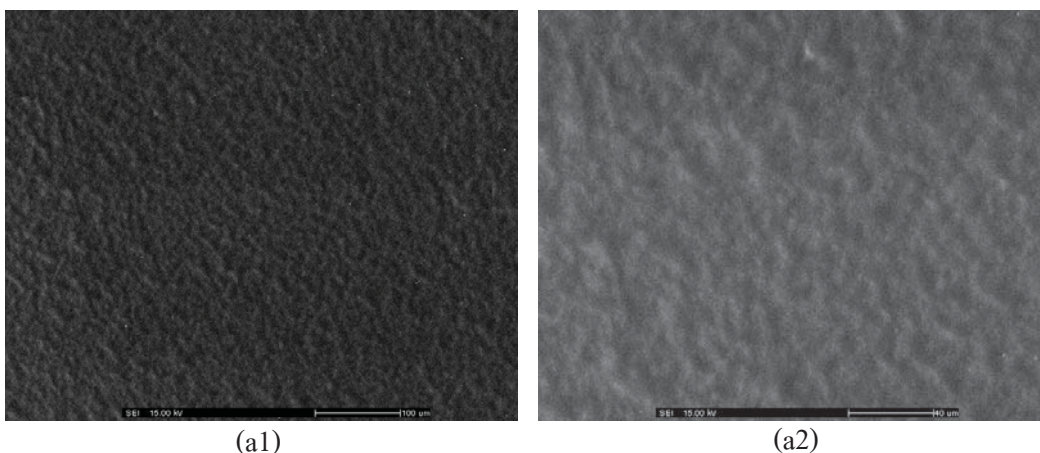
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม

โครงสร้างภายในและผิวหน้าของฟิล์มมีผลต่อสมบัติการซึมผ่าน, สมบัติเชิงกล และความชุ่มชื้นของฟิล์ม โดยองค์ประกอบภายในฟิล์มมีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน ในระหว่างการทำแห้ง ขึ้นกับธรรมชาติของไฮโดรคอลลอยด์และความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในฟิล์ม (Jiménez และคณะ, 2010 อ้างถึง Villalobos และคณะ, 2005)

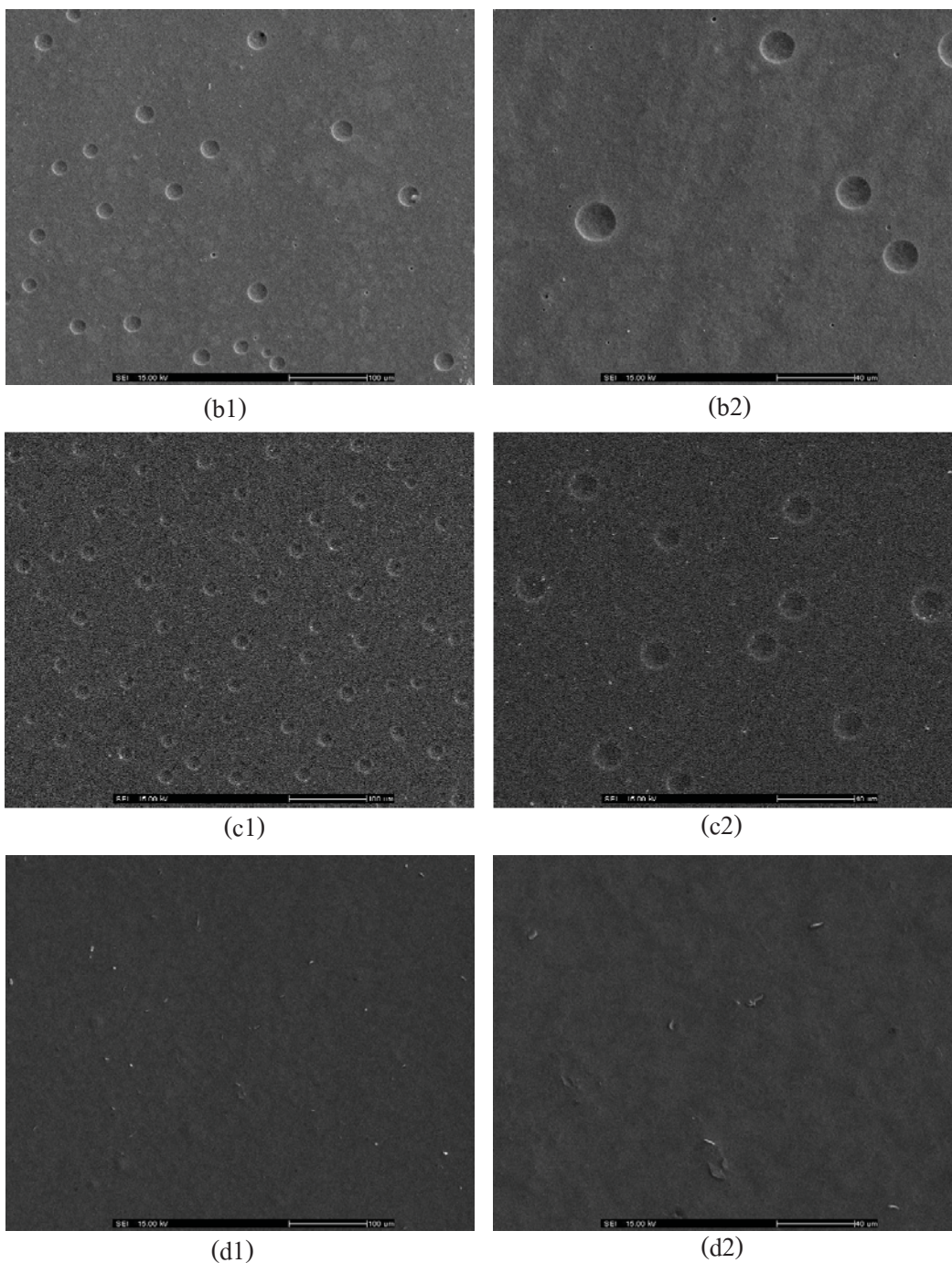
ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบรีโกลได้ที่เตรียมจากสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต ส่องด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope พบว่าพื้นผิวฟิล์มนั้นไม่เรียบ ขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 5a อาจเนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการเตรียมฟิล์มมีการทำให้สตาร์ชผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชแตกออก สายโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแพร่ออกจากเม็ดสตาร์ช จากนั้นเมื่อมีการผ่านกระบวนการ Homogenization ด้วย High pressure homogenization ซึ่งการใช้ความดัน และแรงเฉือน (shear) สูง นั้นจะทำลายพันธะโคเวเลนต์ภายในสายพอลิเมอร์ (Floury และคณะ, 2002) พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งเป็นพันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของกลูโคสในสายอะไมโลส และอะไมโลเพกตินจึงถูกทำลาย ทำให้สายโมเลกุลของอะไมโลส อะไมโลเพกตินสั้นลง ทำให้เกิดปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ได้เร็วขึ้น เกิดการตกผลึกใหม่ (re-crystallization) ของอะไมโลสในระหว่างการทำแห้งฟิล์ม โดยการพันธะเกลือของอะไมโลสจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มในขณะที่มีการระเหยและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เกลืออะไมโลสนี้จะทำให้เกิดผลึกที่ผิวหน้าของฟิล์มมากกว่าในฟิล์มซึ่งที่การลดลงของอุณหภูมิและปริมาณน้ำซ้ากว่า (Jiménez และคณะ, 2012) ดังนั้นในภาคตัดขวางของฟิล์ม (ภาพที่ 6a) จึงไม่เห็นลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น

ในส่วนของฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชผสมลิวติน พบว่ามีตัวอย่างฟิล์มมีพื้นผิวที่เรียบกว่าฟิล์มจากสตาร์ชที่ไม่ผสมลิวติน ดังแสดงในภาพที่ 5 เนื่องจากการผสมลิวตินหรือกรดไขมันจะช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยการเกิดพันธะระหว่างอะไมโลสและลิวติน (Das และคณะ, 2013)

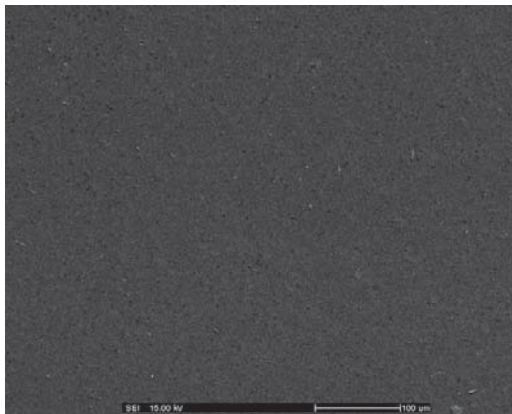
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผสมลิพิด 3 ชนิด คือ กรดโอเลอิก กรดสเตียริก และกรดปาล์มมิก พบว่าฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกแม้จะมีผิวหน้าที่เรียบ แต่พบว่ามีลักษณะของครอปเล็ทไขมันกระจายอยู่ทั่วผิวหน้า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ผสมด้วยกรดไขมันอิ่มตัว แสดงถึงระดับการรวมตัวกันระหว่างกรดโอเลอิกด้วยกันเองในเมทริกซ์ของสตาร์ช ซึ่งการที่กรดโอเลอิกรวมตัวกันเองไม่รวมตัวกับอะไมโลสของสตาร์ช และเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าของฟิล์มในระหว่างการทำแห้ง จึงทำให้เกิดลักษณะของครอปเล็ทของกรดโอเลอิกกระจายอยู่ทั่วผิวหน้าของฟิล์ม ทำให้ผิวหน้าของฟิล์มไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surface) ดังแสดงในรูปที่ 5b และ 5c ในขณะที่ฟิล์มที่ผสมด้วยกรดไขมันอิ่มตัว (ภาพที่ 5d-5g) มีความเรียบสม่ำเสมอของฟิล์มมากกว่า เนื่องจากกรดไขมันอิ่มตัวสามารถรวมตัวกับเกลียวอะไมโลสของสตาร์ชได้ดีกว่า คือ สายโซ่ของกรดไขมันอิ่มตัวจะถูกเก็บไว้ในเกลียวอะไมโลสมากกว่าที่จะเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ผิวหน้าของฟิล์มในระหว่างการทำแห้ง (Singh และคณะ, 2002) นอกจากนี้ที่ผิวหน้าของฟิล์มที่ผสมด้วยกรดไขมันอิ่มตัวมีส่วนของผลึกของกรดไขมันกระจายอยู่เล็กน้อยอย่างสม่ำเสมอ และมีปริมาณมากขึ้นเมื่อปริมาณของกรดไขมันเพิ่มมากขึ้น



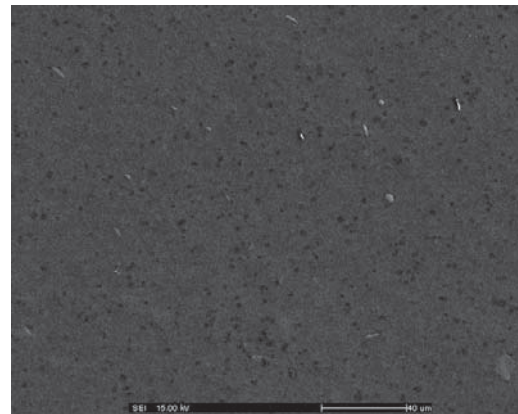
ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ
 หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1,
 d=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1, f=กรดปาล์มมิก:
 สตาร์ช=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิก:สตาร์ช=0.2:1
 1 = กำลังขยาย 200 เท่า และ 2 = กำลังขยาย 500 เท่า



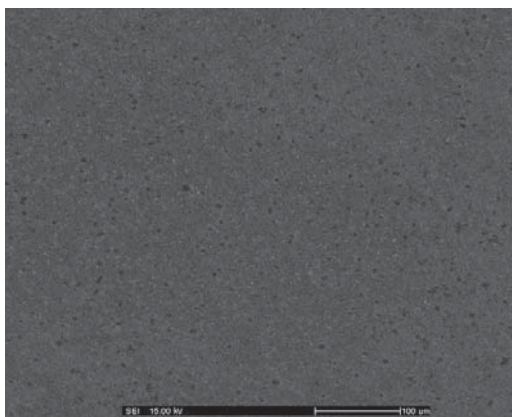
ภาพที่ 5 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ซและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ
 หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ซ=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ซ=0.2:1,
 d=กรดสเตียริก:สตาร์ซ=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ซ=0.2:1, f=กรดปาล์มมิติก:
 สตาร์ซ=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ซ=0.2:1
 1 = กำลังขยาย 200 เท่า และ 2 = กำลังขยาย 500 เท่า



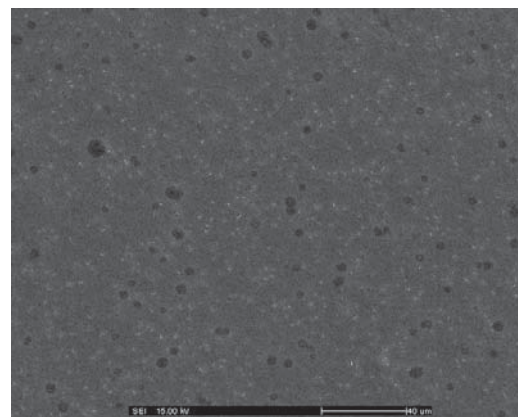
(e1)



(e2)

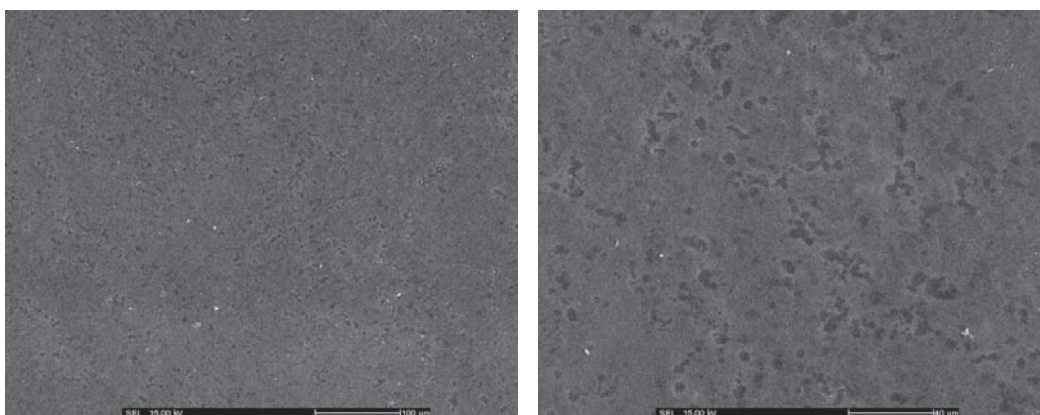


(f1)



(f2)

ภาพที่ 5 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ
 หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1,
 d=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1, f=กรดปาล์มมิติก:
 สตาร์ช=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1
 1 = กำลังขยาย 200 เท่า และ 2 = กำลังขยาย 500 เท่า



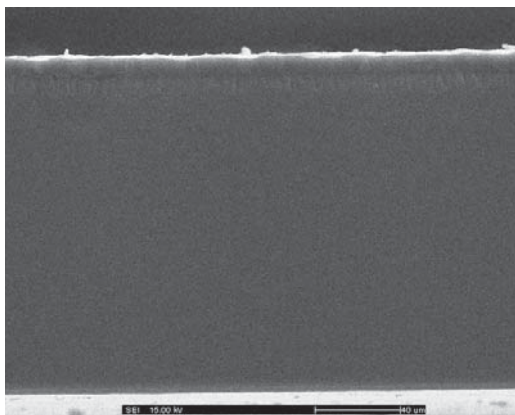
(g1)

(g2)

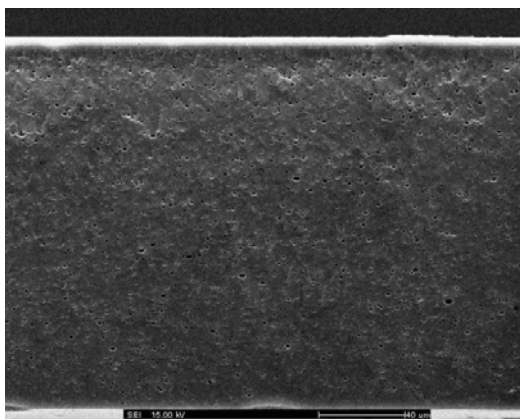
ภาพที่ 5(ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ
 หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1,
 d=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1, f=กรดปาล์มมิติก:
 สตาร์ช=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1
 1 = กำลังขยาย 200 เท่า และ 2 = กำลังขยาย 500 เท่า

ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope แสดงดังในภาพที่ 6 พบว่าฟิล์มสูตรควบคุมที่ไม่ผสมลิพิดมีลักษณะของฟิล์มที่เรียบ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนฟิล์มที่มีการผสมกรดไขมันอิ่มตัว (กรดปาล์มมิติกและกรดสเตียริก) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (กรดโอเลอิก) จะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม เนื่องจากมีส่วนของลิพิดที่กระจายตัวในส่วนของพอลิเมอร์-ซอร์บิทอล ระดับความไม่เป็นเนื้อเดียวกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของลิพิด (McClements, 2005) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความแตกต่างกันของโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน ฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกจะสังเกตเห็นรูปร่างของดรอปลีที่กระจายอยู่ในส่วนของพอลิเมอร์ได้ชัดเจน เนื่องจากกรดโอเลอิกมีพันธะคู่ทำให้โครงสร้างไม่เป็นเส้นตรงจึงทำให้เกิดการรวมตัวกับส่วนที่มีโครงสร้างเป็นแบบเฮลิกซ์ของอะไมโลสได้ยาก (Jiménez และคณะ, 2012)

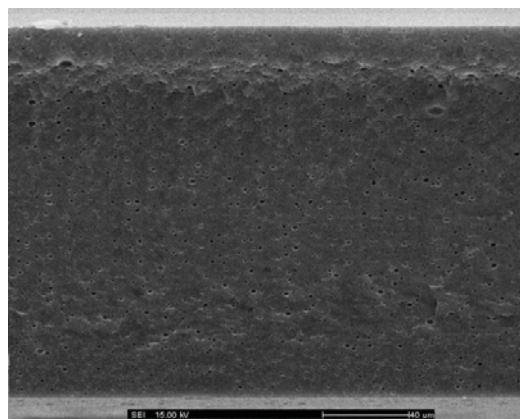
สำหรับฟิล์มที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัวทั้งกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติก กรดไขมันมีการกระจายตัวในเมทริกซ์ของสตาร์ชดีกว่ากรดโอเลอิก ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า แต่กลับพบลักษณะของช่องว่างเล็กๆ (Microvoid) จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไป เนื่องจากมีฟองอากาศขนาดเล็กที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยเครื่องกำจัดฟองก๊าซ (Colla และคณะ, 2006) จึงทำให้เกิดลักษณะของช่องว่างเล็กๆ (Microvoid) จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วไปในตัวอย่างฟิล์ม



(a)



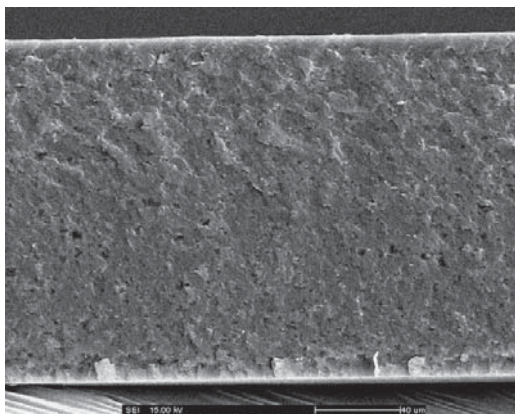
(b)



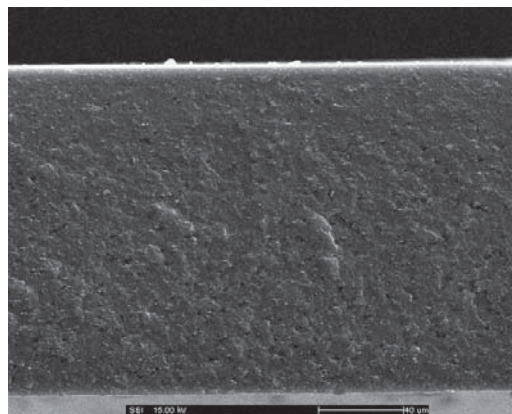
(c)

ภาพที่ 6 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วน
ต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

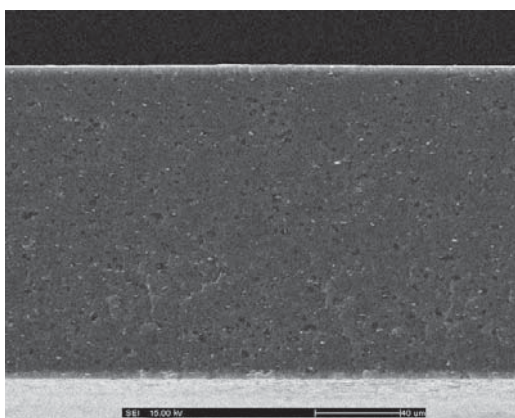
หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1,
d=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1, f=กรดปาล์มมิติก:
สตาร์ช=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1



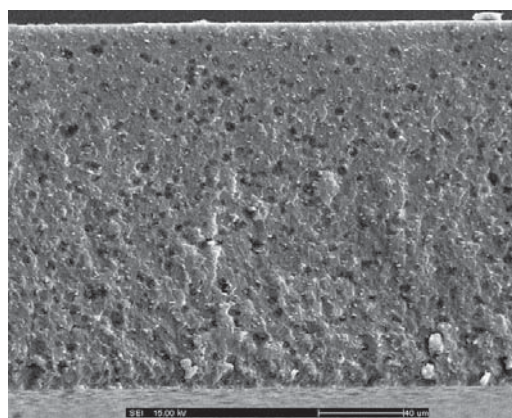
(d)



(e)



(f)



(g)

ภาพที่ 6 (ต่อ) ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 500 เท่า

หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1, d=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1, f=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1

4.1.2 ผลการศึกษาด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

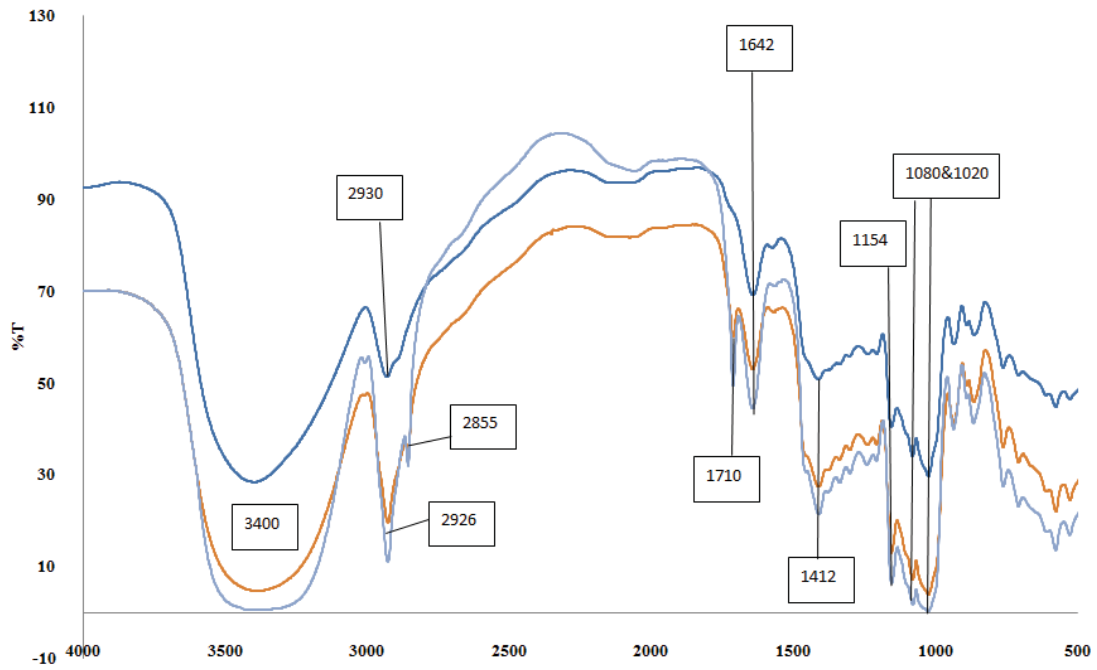
การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบที่ใช้ในการทำฟิล์มสามารถศึกษาได้ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยเมื่อมีสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกัน การผสมกันทั้งทางกายภาพและการทำปฏิกิริยาเคมีทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสเปกตรัม

(Xu และคณะ, 2005 อ้างถึง Guan และคณะ, 1998 และ Yin และคณะ, 1999) ซึ่งอาจพบการเปลี่ยนแปลงได้ 2 ลักษณะ ดังนี้ 1) การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีค และ 2) ความเข้มของพีคที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีค ตัวอย่างเช่น การศึกษาปฏิสัมพันธ์ภายในฟิล์มประกอบระหว่างสตาร์ชข้าวโพดหรือข้าวโพดข้าวเหนียวกับไคโตซานที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคหมู่อะมิโนในไคโตซานจาก 1578 เป็น 1584 cm^{-1} (Xu และคณะ, 2005) หรือ การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างสตาร์ชข้าวเจ้ากับไคโตซานที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคหมู่อะมิโนในไคโตซานจาก 1541.15 เป็น 1621.96 cm^{-1} ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคหมู่อะมิโนนี้แสดงให้เห็นว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชกับหมู่อะมิโนของไคโตซาน โดยการเกิดโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ของสตาร์ชและหมู่อะมิโนของไคโตซาน ซึ่งสามารถอธิบายผลของการผสมไคโตซานลงในฟิล์มจากสตาร์ชแล้วมีค่า Tensile strength สูงขึ้น (Bourtoom และ Chinnan, 2008) สำหรับการเปลี่ยนแปลงลักษณะของสเปกตรัมในลักษณะของความเข้มของพีคที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่น การใช้ FTIR spectroscopy ด้วยเทคนิค attenuated total reflection (ATR) ศึกษาปฏิสัมพันธ์ภายในฟิล์มระหว่างโปรตีน Quinoa – ไคโตซาน – น้ำมันดอกทานตะวัน พบว่า เมื่อเติมน้ำมันดอกทานตะวันลงในฟิล์มจากไฮโดรคอลลอยด์ พบว่าความเข้มของพีคที่ 3263 cm^{-1} ของฟิล์มลดลง เมื่อมี ionic interaction ลดลง (Valenzuela และคณะ, 2013) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาฟิล์มบิริโกลได้ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 4000-500 cm^{-1} ได้สเปกตรัม ดังภาพที่ 7 สเปกตรัมของฟิล์มตัวอย่างสูตรควบคุมไม่ผสมลิพิดพบพีคลักษณะกว้างที่เลขคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ช ช่วงเลขคลื่น 900–1200 cm^{-1} เป็นช่วงเลขคลื่นที่แสดงลักษณะที่มีความจำเพาะเจาะจงแบบ (Fingerprint) ของการสั่นจากการยืดของพันธะ C-O-C ของกลูโคส พีคที่เลขคลื่นประมาณ 1154 cm^{-1} เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นจากการยืดของพันธะ C-O ของหมู่ C-O-H พีคที่ 1080 และ 1020 cm^{-1} เกิดจากการยืดของพันธะ C-O ของหมู่ C-O-C ในวงแหวนแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose ring) พีคที่ 1412 cm^{-1} เป็นพีคของหมู่คาร์บอกซิลจากหมู่ซัคซินิล (Chang และคณะ, 2012) พีคที่ 2927 cm^{-1} เป็นพีคที่เกิดจากการยืดของพันธะ C-H ส่วนพีคที่ 1642 cm^{-1} เกิดจากการงอของพันธะ H-O-H (Hu และคณะ, 2013)

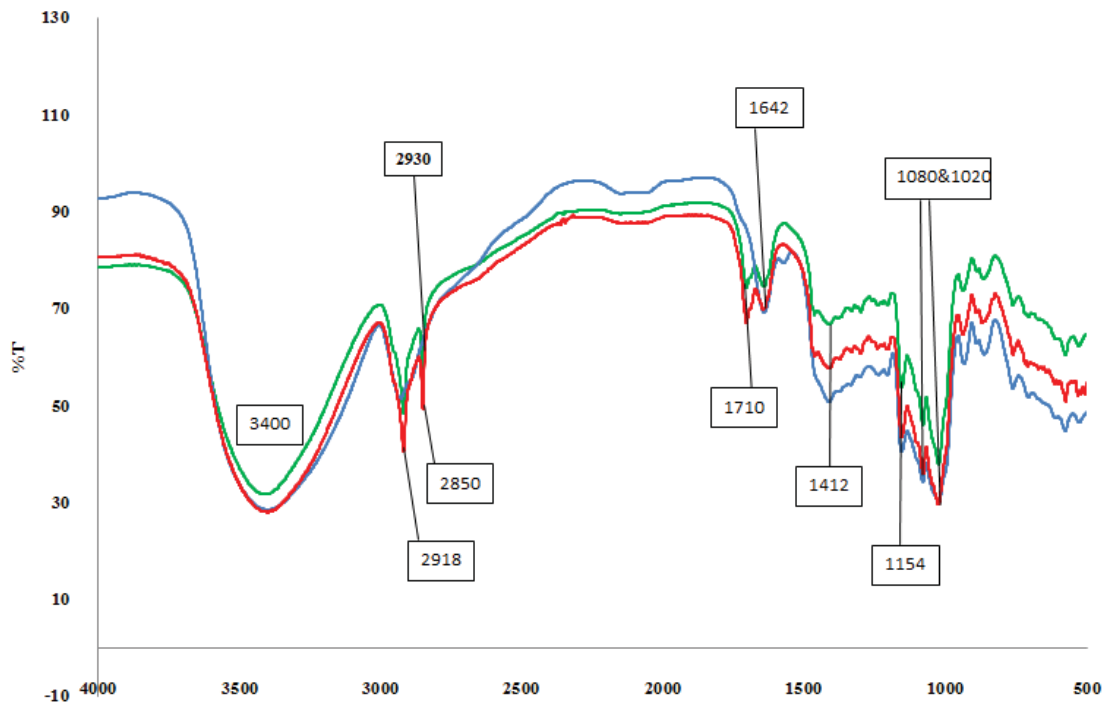
สำหรับสเปกตรัมของฟิล์มตัวอย่างที่ผสมกรดโอเลอิก กรดสเตียริก และกรดปาล์มมิติก พบว่ามีการเกิดพีคในตำแหน่งที่ต่างกับฟิล์มตัวอย่างสูตรควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 7, 8 และ 9

โดยฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิก พบว่ามีพีคที่เกิดจากการสั่นจากการยืดแบบสมมาตรของหมู่ $-CH_3$ และ $-CH_2$ ของกรดโอเลอิกเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 2926 และ 2856 cm^{-1} ตามลำดับ และพีคที่ 1710 cm^{-1} เกิดจากการสั่นจากการยืดของหมู่ $C=O$ ของกรดโอเลอิก (Kong และคณะ, 2008) ส่วนกรดไขมันอิ่มตัวสเตียริกและปาล์มมิติกจะมีพีคที่เกิดจากการสั่นจากการยืดแบบสมมาตรของหมู่ $-CH_3$ และ $-CH_2$ ของกรดโอเลอิกเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 2917 cm^{-1} 2850 cm^{-1} ตามลำดับ (Teixeira และคณะ, 2007) พีคที่เลขคลื่น 1704 cm^{-1} เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นจากการยืดของหมู่ $C=O$ ของกรดสเตียริกและปาล์มมิติก (Fang และคณะ, 2011) ซึ่งพีคที่พบในฟิล์มที่ผสมกรดไขมันที่ต่างจากฟิล์มสูตรควบคุม นั้นเป็นเพียงพีคที่เกิดขึ้นจากหมู่ฟังก์ชันของกรดไขมันนั้นๆ แต่ไม่พบพีคที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิม ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อเติมส่วนผสมที่เป็นลิพิดลงไปในฟิล์ม พีคการดูดกลืนสัญญาณที่เลขคลื่นช่วง $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคที่สัมพันธ์กับหมู่ไฮดรอกซิลนั้นลดลง แสดงให้เห็นถึงความเป็นไฮโดรฟิลิกของฟิล์มที่ลดลง (Pereda และคณะ, 2010) แต่ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีคในงานวิจัยนี้นั้นยังสรุปไม่ได้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาฟิล์มด้วย FTIR spectroscopy ในโหมด transmission ซึ่งมีการบดตัวอย่างผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แต่เนื่องจากในการเตรียมตัวอย่างเตรียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ฟิล์มมีสถานะเป็นของแข็งคล้ายยาง (rubbery state) ทำให้ฟิล์มค่อนข้างเหนียว จึงอาจทำให้ฟิล์มที่บดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์กระจายตัวไม่สม่ำเสมอทั่วกัน จึงทำให้การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีคนั้นไม่สามารถสรุปผลได้ ซึ่งสังเกตจากความเข้มของพีคที่ย่านประมาณ 3600 cm^{-1} ที่มีความเข้มของพีคแตกต่างกันเมื่อใช้ตัวอย่างเดียวกันในการทดสอบแต่ละครั้ง (ภาพที่ 21-27)



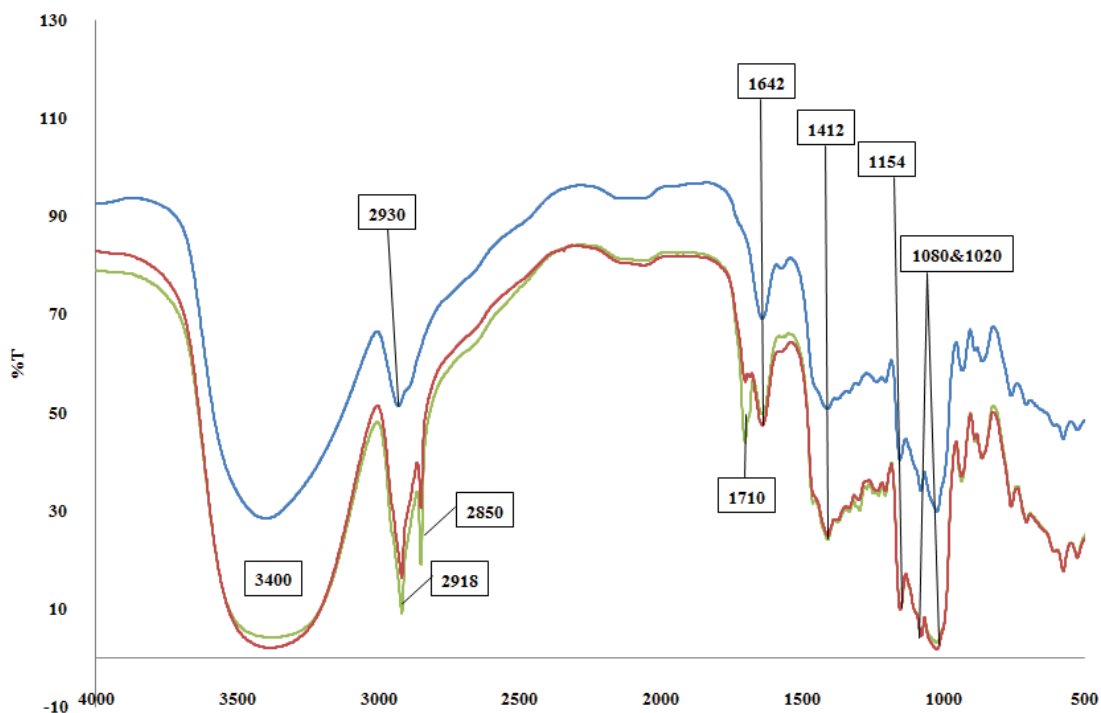
ภาพที่ 7 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบระหว่างสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด)กับฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิก โดยมีอัตราส่วนระหว่างกรดโอเลอิก:สตาร์ช = 0.1:1 และ 0.2:1

- หมายเหตุ
- หมายถึง สูตรควบคุม (ไม่ผสมลิพิด)
 - หมายถึง กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1
 - หมายถึง กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1



ภาพที่ 8 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบระหว่างสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด)กับฟิล์มที่ผสมกรดเตียริกโดยมีอัตราส่วนระหว่างกรดเตียริก:สตาร์ช = 0.1:1 และ 0.2:1

- หมายเหตุ
- หมายถึง สูตรควบคุม (ไม่ผสมลิพิด)
 - หมายถึง กรดเตียริก:สตาร์ช=0.1:1
 - หมายถึง กรดเตียริก:สตาร์ช=0.2:1



ภาพที่ 9 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบระหว่างสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด)กับฟิล์มที่ผสมกรดปาล์มมิติกโดยมีอัตราส่วนระหว่างกรดปาล์มมิติก:สตาร์ช = 0.1:1 และ 0.2:1

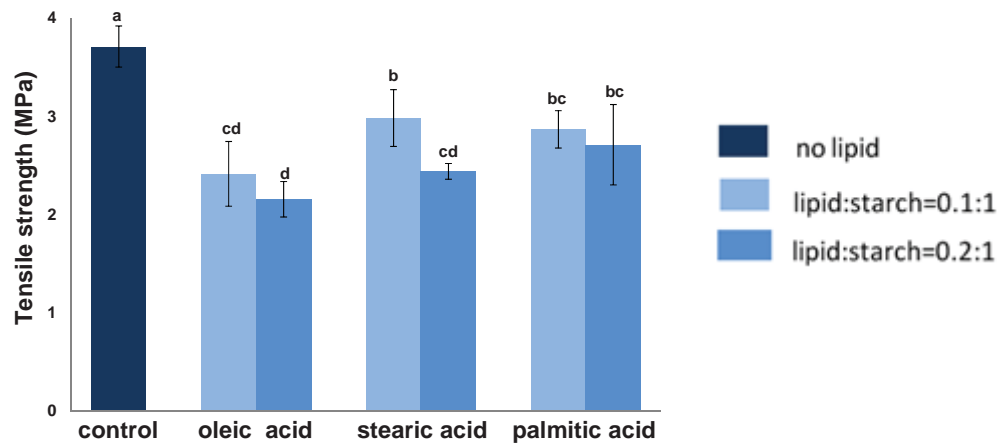
- หมายเหตุ
- หมายถึง สูตรควบคุม (ไม่ผสมลิพิด)
 - หมายถึง กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.1:1
 - หมายถึง กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1

4.1.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มบริโกลได้

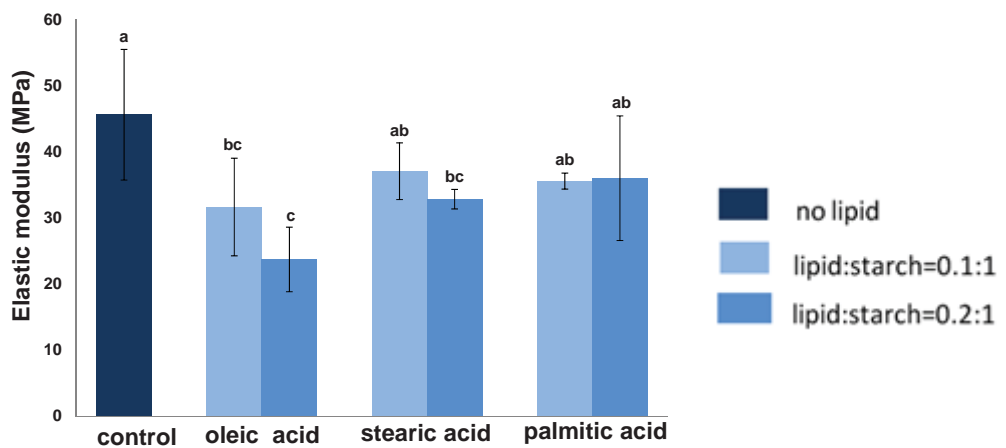
สมบัติเชิงกลของฟิล์มบริโกลได้ ได้แก่ ค่า Tensile strength, ค่า %Elongation at break และค่า Elastic modulus สำหรับค่า Tensile strength ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มตัวอย่างขาดหรือแยกออกจากกันเป็น 2 ส่วน และค่า Elastic modulus ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นในระดับโมเลกุลภายในฟิล์มตัวอย่าง ซึ่งถ้าค่า Elastic modulus มีค่ามาก แสดงว่าพันธะของโมเลกุลในฟิล์มตัวอย่างมีความแข็งแรงมาก ส่วนค่า %Elongation at break เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการยืดขยายของฟิล์มตัวอย่าง เมื่อมีแรงดึงมากระทำจนกระทั่งฟิล์มขาดหรือแยกออกจากกัน โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์อ้างอิงจากความยาวเริ่มต้น (Maftoonazad และคณะ, 2007)

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบริโกลได้คือค่า Tensile strength, ค่า %Elongation at break และค่า Elastic modulus พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่มีการผสมลิพิดจะมีค่า Tensile strength และ Elastic modulus ต่ำกว่าสูตรควบคุม (ไม่ผสมลิพิด) ดังแสดงในภาพที่ 10a และ 10b เนื่องจากการผสมลิพิดจะทำให้ฟิล์มตัวอย่างมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอในโครงสร้างร่างแหของพอลิเมอร์ (Fabra และคณะ, 2008) เกิดความไม่ต่อเนื่องกันของพอลิเมอร์ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์ลดลง (Jiménez และคณะ, 2012) หรือเกิดจุดแตกหักมากขึ้น (Bravin และคณะ, 2004) จึงทำให้ค่า Tensile strength และ Elastic modulus ลดลงในฟิล์มที่มีการผสมลิพิด (Jiménez และคณะ, 2010) สำหรับฟิล์มที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัวทั้งกรดสเตียริก (อัตราส่วนลิพิดต่อสตาร์ช เท่ากับ 0.1ต่อ1) และกรดปาล์มมิติก (อัตราส่วนลิพิดต่อสตาร์ช เท่ากับ 0.1ต่อ1 และ 0.2ต่อ1) พบว่าค่า Elastic modulus ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิด ส่วนตัวอย่างฟิล์มที่มีการผสมกรดโอเลอิกมีค่า Tensile strength และ Elastic modulus น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิดหรือฟิล์มที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัว เนื่องจากกรดปาล์มมิติกและกรดสเตียริกมีสถานะเป็นของแข็งภายในโครงสร้างร่างแหของพอลิเมอร์ ณ อุณหภูมิที่ทดสอบ ส่งผลให้ฟิล์มตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากกว่าฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว ณ อุณหภูมิที่ทดสอบจึงสามารถเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อมีแรงมากระทำกับฟิล์มตัวอย่าง (วิราวัลย์, 2554) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jiménez และคณะ (2012) ที่พบว่าการเติมกรดโอเลอิกในฟิล์มบริโกลได้จากสตาร์ชข้าวโพด ส่งผลให้ค่า Elastic modulus มีค่าน้อยกว่าฟิล์มที่เติมกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติก

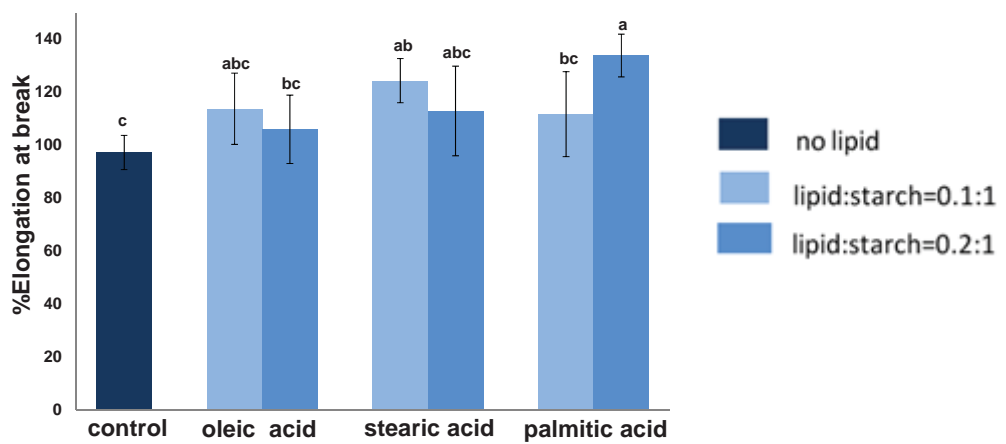
ตัวอย่างฟิล์มที่มีการผสมกรดไขมันพบว่าค่า %Elongation at break มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 10c เนื่องจากรดไขมันจะประพุดิตนคล้ายพลาสติกไซเซออร์ทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการยืดตัวและมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น (Jiménez และคณะ, 2012 อ้างถึง Fabra และคณะ, 2010a; Monedero และคณะ, 2009; Rhim, และคณะ, 1999)



(a)



(b)



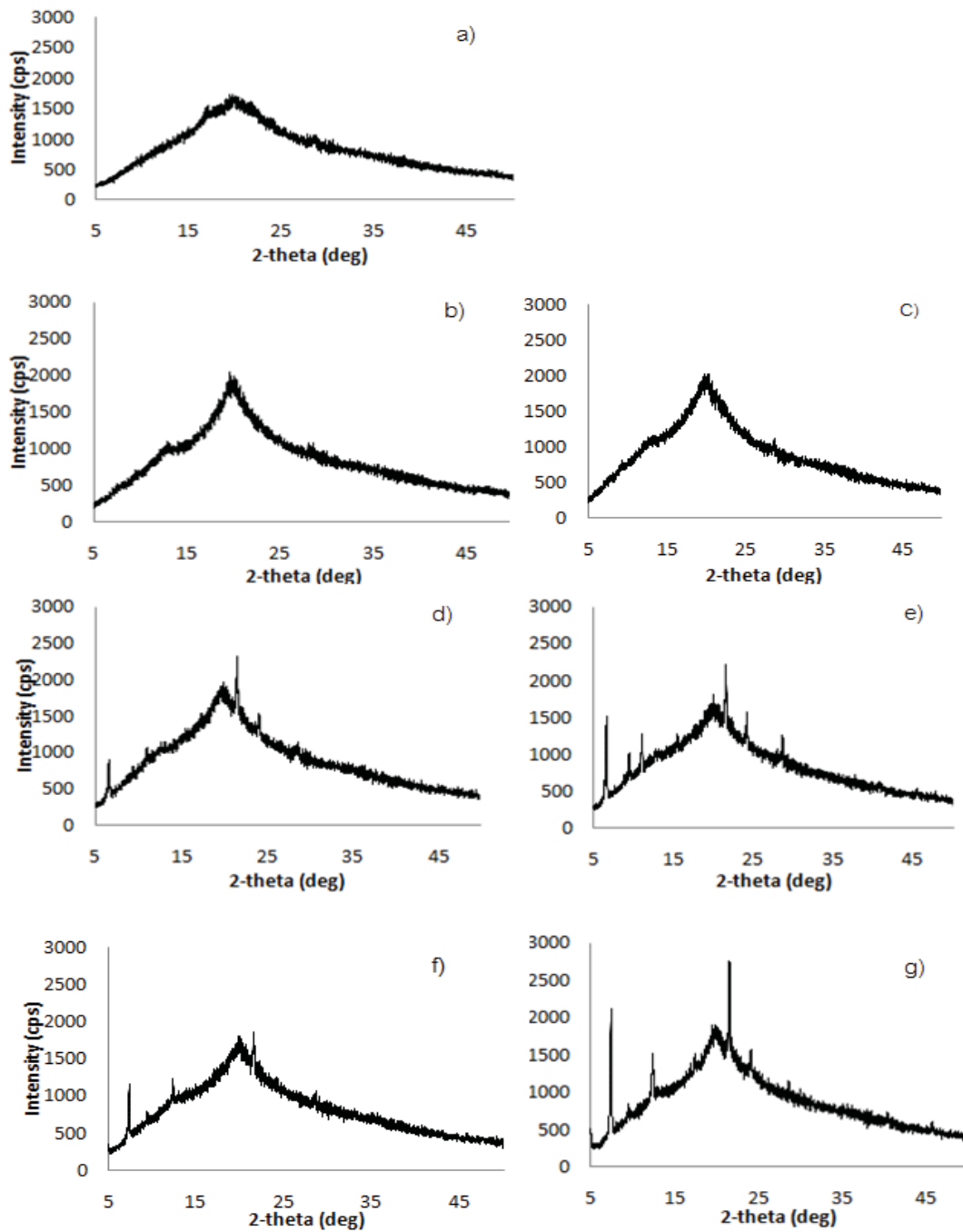
(c)

ภาพที่ 10 ค่า Tensile strength (a), ค่า Elastic modulus (b) และ ค่า %Elongation at break (c) ของ ตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ

4.1.4 ผลึกภายในฟิล์ม

จากการศึกษาผลึกภายในฟิล์ม โดยพิจารณาจากการเกิด peak ของฟิล์มตัวอย่างที่มีและไม่มีการผสมลิพิด ดังแสดงในภาพที่ 11 พบว่าฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิดหลังจากที่ฟิล์มผ่านการทำให้เกิดเจลาติโนเซชัน พบว่า เกิด peak กว้างที่มุม 2θ ตั้งแต่ $5-25^\circ$ ซึ่งเป็นลักษณะผลึกเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) เป็นลักษณะที่พบได้เช่นเดียวกันกับฟิล์มจากสตาร์ชข้าว (Bourtoom และ Chinnan, 2008) ส่วนตัวอย่างฟิล์มที่ผสมลิพิดทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว พบ peak ที่มุม 2θ เท่ากับ 19.7° ซึ่งเป็นลักษณะผลึกแบบ V-type ซึ่งเป็นลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิพิด (Fanta และคณะ, 1999)

สำหรับฟิล์มตัวอย่างที่มีการผสมกรดไขมันอิ่มตัวจะแสดงรูปแบบการเกิดผลึก ดังในภาพที่ 11d, e, f และ g พบว่าจากภาพที่ 11 d และ e ซึ่งเป็น X-ray diffraction patterns ของฟิล์มตัวอย่างที่ผสมกรดสเตียริกมีการเกิด peak ขึ้นที่มุม 2θ ตำแหน่งเดียวกันกับ X-ray diffraction patterns ของกรดสเตียริกในงานวิจัยของ Teixeira และคณะ (2010) ที่แสดงในภาพที่ 3 ส่วนฟิล์มตัวอย่างที่ผสมกรดปาล์มมีดิกนั้นมี X-ray diffraction patterns เป็นดังภาพที่ 10 f และ g ซึ่งพบว่าการเกิด peak ขึ้นที่มุม 2θ ตำแหน่งเดียวกันกับ X-ray diffraction patterns ของกรดปาล์มมีดิกในงานวิจัยของ Fang และคณะ (2012) ที่แสดงในภาพที่ 4 ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวทั้งสองนี้มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (25 องศาเซลเซียส) จึงพบเป็นผลึกของแข็งภายในฟิล์ม การเกิดพื้นที่ใต้ peak ที่ 21.4 และ 23.8° จะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายโซ่ของกรดไขมันเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลลักษณะเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Fanta และคณะ (1999) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นจากอัตราส่วนของลิพิด ต่อ สตาร์ชจาก 0.1 ต่อ 1 เป็น 0.2 ต่อ 1 พบว่าความสูงของ peak เพิ่มขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ภายในฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ

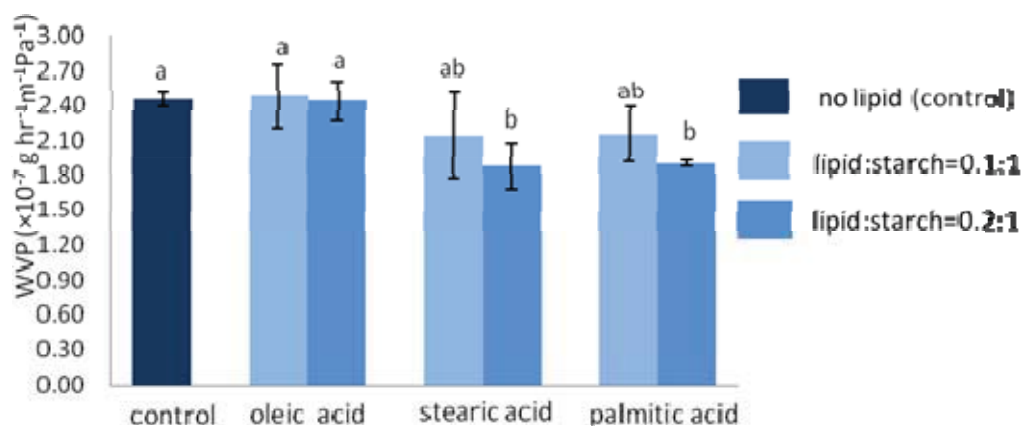
หมายเหตุ a=ควบคุม (ไม่ผสมลิพิด), b=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1, c=กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1, d=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1, e=กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1, f=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.1:1 และ g=กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1

4.1.5 ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ

ผลการศึกษาความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและลิพิดในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ทดสอบที่ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างสองด้านของฟิล์มระหว่างความชื้นสัมพัทธ์เหนือผิวหน้าฟิล์มที่ร้อยละ 75 ± 5 กับด้านล่างของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 แสดงในภาพที่ 12 พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่ผสมด้วยกรดโอเลอิกมีความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากการกระจายตัวของกรดโอเลอิกที่ไม่สม่ำเสมอภายในตัวอย่างฟิล์ม ซึ่งจากลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มที่ได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope สามารถสังเกตเห็นครอปลักษณ์ของกรดไขมันที่กระจายตัวไม่ต่อเนื่องในส่วนของพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 6 นอกจากนี้จากภาพที่ 11 ยังพบว่าฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกไม่พบผลึกของกรดโอเลอิก ซึ่งการที่ลิพิดมีสถานะเป็นของเหลวจะทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อการแพร่ผ่านของแก๊สและไอน้ำต่ำกว่าลิพิดที่มีสถานะเป็นของแข็ง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของลิพิดเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่าทำให้สมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านลดลง (Krochta และคณะ, 1994)

เมื่อพิจารณาความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัว พบว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.1 ต่อ 1 นั้นไม่แตกต่างจากฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิดเนื่องจากแม้ว่ากรดไขมันอิ่มตัวจะมีสถานะเป็นของแข็ง ณ อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ (25 องศาเซลเซียส) และสามารถกระจายตัวสม่ำเสมอและต่อเนื่องในส่วนของพอลิเมอร์ แต่ฟิล์มที่มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.1 ต่อ 1 นั้นมีปริมาณของผลึกน้อยกว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1 (จากภาพที่ 11) ทำให้การเรียงตัวของผลึกของกรดไขมันในฟิล์มที่มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.1 ต่อ 1 ยังไม่หนาแน่นพอที่จะทำให้ความต้านทานการแพร่ผ่านของแก๊สและไอน้ำของฟิล์มมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในขณะที่ฟิล์มที่มีอัตราส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1 นั้นพบว่าความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มแตกต่างจากฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เนื่องจากมีส่วนผลึกของกรดไขมันเรียงตัวอย่างหนาแน่นเพียงพอที่จะส่งผลให้ป้องกันการแพร่ผ่านของไอน้ำได้ดี เป็นไปตามแบบจำลอง micropathway ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อธิบายการแพร่ผ่านของไอน้ำในฟิล์มในระบบอิมัลชันว่าเมื่อเพิ่มความคดเคี้ยว (tortuosity) ของเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำภายในฟิล์มจะสามารถช่วยลดอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำในฟิล์มได้ ซึ่งการผสมลิพิดลงไปในนั้น ลิพิดซึ่งมีความเป็นส่วนใหญ่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะขวางเส้นทางการเคลื่อนที่

ของไอน้ำภายในฟิล์ม ทำให้โมเลกุลของไอน้ำเคลื่อนที่ได้ยากและใช้เวลานานขึ้น ดังนั้นการผสมลิพิดจึงทำให้อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มมีค่าลดลง (Krochta, 1990) นอกจากนี้การผสมลิพิดซึ่งเป็นการผสมองค์ประกอบที่ไม่มีขั้วลงไปในระบบในปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำยังลดลงเนื่องจากมีส่วนประกอบที่เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มสมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม (Garcia และคณะ, 2000)



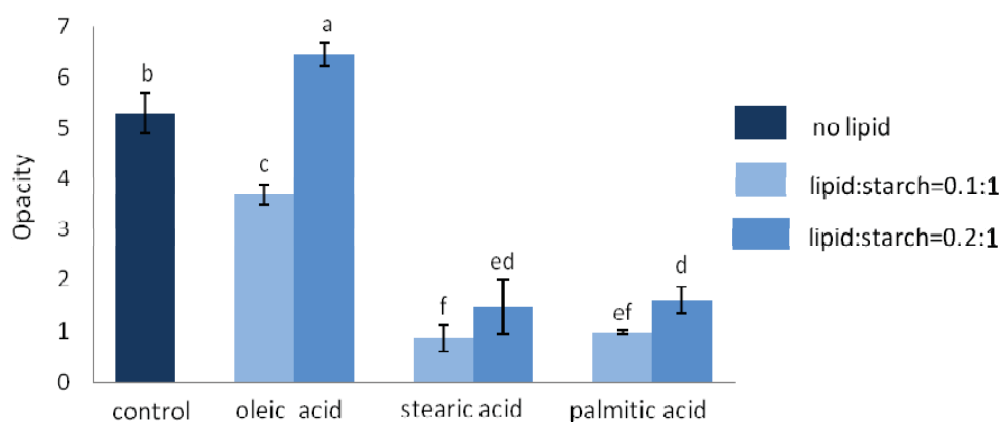
ภาพที่ 12 ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ ของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส ทดสอบ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกด้วยร้อยละ 75±5 และความชื้นสัมพัทธ์ภายในด้วยร้อยละ 0

4.1.6 ความขุ่น

ผลการศึกษาความขุ่นของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและลิพิดในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 13 พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่ไม่ผสมลิพิดมีความขุ่นมากกว่าฟิล์มที่ผสมลิพิด (ยกเว้นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของกรด โอเลอิกต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผสมกรดไขมันอีมตัวกับฟิล์มที่ผสมกรดไขมันไม่อีมตัว พบว่า ฟิล์มตัวอย่างที่ผสมกรดไขมันอีมตัวทั้งกรดสเตียริกและกรดปาล์มมิติก มีความขุ่นน้อยกว่าฟิล์มที่ผสมด้วยกรดโอเลอิกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ความขุ่นของฟิล์มนั้นสัมพันธ์กับลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม โดยพื้นผิวที่ขรุขระมากจะมีค่าความขุ่นมาก (Villalobos และคณะ, 2005) และเนื่องจากฟิล์มตัวอย่างที่ไม่ผสมลิพิดมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ (ดังภาพที่ 5a) จึงทำให้ค่าความขุ่นมากกว่าฟิล์มตัวอย่างที่ผสมลิพิด ยกเว้น

ฟิล์มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของกรดโอเลอิกต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1 ที่มีความขุ่นของฟิล์มมากกว่าฟิล์มตัวอย่างที่ไม่ผสมลิพิดเนื่องจากมีครอพลทของกรดโอเลอิกจำนวนมากที่กระจายอยู่ทั่วผิวหน้าของฟิล์มซึ่งส่งผลให้ผิวหน้าของฟิล์มขรุขระมากจึงทำให้ฟิล์มมีความขุ่นมาก



ภาพที่ 13 ค่าความขุ่น (Opacity) ของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ

4.2 ผลของสารเคลือบจากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนตและลิพิดต่อคุณภาพของขนมข้าวอบกรอบอะราเร่

เมื่อพิจารณาด้านความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจากสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนตที่ไม่ผสมลิพิด ฟิล์มจากสตาร์ชที่มีการผสมกรดไขมันไม่อิ่มตัว และฟิล์มจากสตาร์ชที่มีการผสมกรดไขมันอิ่มตัว พบว่าฟิล์มจากสตาร์ชที่มีการผสมกรดไขมันอิ่มตัว คือ กรดปาล์มมิติกและกรดสเตียริก ที่ความเข้มข้นของกรดไขมันต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1 มีค่าต่ำที่สุดแสดงให้เห็นว่ากรดไขมันอิ่มตัวสามารถช่วยป้องกันการซึมผ่านไอน้ำได้ดีที่สุด นอกจากนี้ฟิล์มดังกล่าวยังมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่มีการผสมกรดไขมันผู้วิจัยจึงเลือกกรดไขมันอิ่มตัวที่ระดับความเข้มข้นของกรดไขมันต่อสตาร์ช เท่ากับ 0.2 ต่อ 1 มาผสมในสารเคลือบที่ใช้ในการเคลือบขนมข้าวอบกรอบอะราเร่เพื่อศึกษาผลของสารเคลือบต่อคุณภาพของขนมข้าวอบกรอบอะราเร่เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เคลือบสตาร์ชตัดแปรรอบที่นิลซัคซิเนตซึ่งไม่มีกรดไขมัน ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำในรูปของฟิล์มบริโกลได้กับสารเคลือบอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของการเคลือบ การ

เกาะติดของสารเคลือบบนผลิตภัณฑ์ ความหนาของชั้นสารเคลือบ ความเป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (สิริกานต์, 2553)

4.2.1 แอดซอร์ปชันไอโซเทอร์มของตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบ

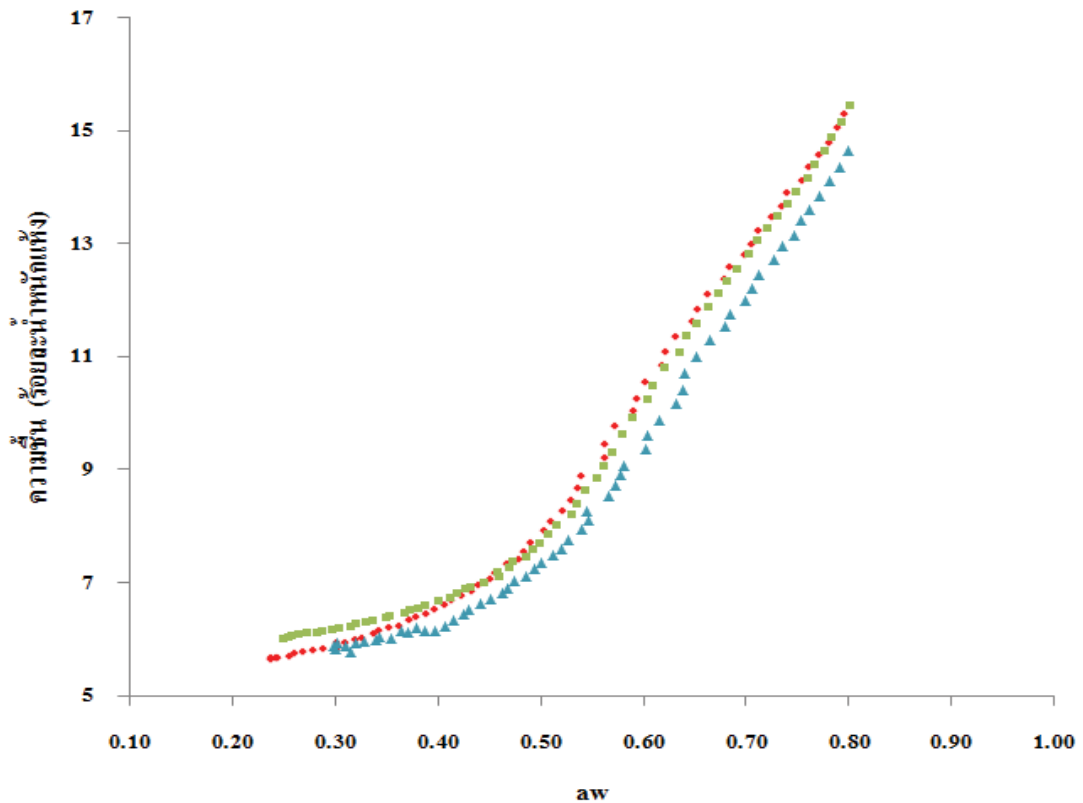
ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีปริมาณความชื้นต่ำ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ extrusion เช่น บิสกิต, ขนมขบเคี้ยว และซีเรียล ที่มีเนื้อสัมผัสกรอบอันเป็นความต้องการของผู้บริโภค การสูญเสียความกรอบ และแข็งขึ้นของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สูงนั้นเกิดจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งการดูดซับความชื้น (Moisture adsorption) เป็นผลเนื่องมาจากหลักการเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลความชื้นของผลิตภัณฑ์ (water activity equilibrium) และการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการการส่งผ่านมวล ความแตกต่างของวอเตอร์แอกติวิตี (water activity; a_w) ของอาหาร หรือองค์ประกอบของอาหารกับสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ทำให้เกิดแรงในการเคลื่อนที่ของน้ำ (Labuza และ Hyman, 1998)

ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตีกับปริมาณความชื้น ณ ที่อุณหภูมิหนึ่งนี้ เรียกว่า ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม (sorption isotherm) ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะมีค่าเฉพาะในแต่ละผลิตภัณฑ์ เนื่องจากแต่ละผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำและปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นของแข็งแตกต่างกัน โดยส่วนมากในอาหารจะมีการเพิ่มขึ้นของค่าวอเตอร์แอกติวิตี ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นเป็นรูปร่างซิกมอยด์ แต่อาหารที่ปริมาณน้ำต่ำสูงหรือมีโมเลกุลที่สามารถละลายได้อยู่เล็กน้อยจะมีซอร์ปชันไอโซเทอร์มเป็นรูปตัว J สำหรับการเกิด moisture sorption ในขั้นแรกนั้น โมเลกุลของน้ำจะสร้างพันธะกับโมเลกุลอื่นๆที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร เรียกว่า ปริมาณความชื้นระดับชั้นโมโนเลเยอร์ (monolayer moisture) ซึ่งปริมาณความชื้นนี้จะถูกดูดซับโดยองค์ประกอบในอาหารที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) หรือโมเลกุลที่มีขั้ว (โพลีแซคคาไรด์, โปรตีน เป็นต้น) (Andrade และคณะ, 2011)

ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้สารเคลือบสามารถช่วยป้องกันการดูดซับความชื้นได้ โดยพบว่าผิวของขนมข้าวอบกรอบที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบมีความสม่ำเสมอของพื้นผิวมากกว่าและพบรูพรุนน้อยกว่าขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบ ซึ่งรูพรุนหรือช่องว่างบนพื้นผิวเป็นช่องทางให้โมเลกุลของไอน้ำผ่านไปได้ ขนมข้าวอบกรอบที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบจึงมีการดูดซับความชื้นน้อยกว่าขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบ (สิริกานต์, 2553) ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบผลของลึฟิดในสารเคลือบต่อความสามารถในการป้องกันการดูดซับความชื้นของขนมข้าวอบกรอบ โดยศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบสารเคลือบที่ผสมเปรียบเทียบกับสารเคลือบที่ไม่ผสมลึฟิด ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 องศาเซลเซียส ผลแสดง

ดังในภาพที่ 14 พบว่า ลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของขนมอบกรอบจะมีการดูดความชื้นในช่วงแรกอย่างช้าๆ และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติ (critical water activity) ซึ่งเป็นค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้ว (glassy state) เป็นของแข็งคล้ายยาง (rubbery state) (Barbosa-Cánovas และคณะ, 2008) ค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติของขนมข้าวอบกรอบอะราระห์หลังเคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า เมื่อผสมกรดไขมันลงในสารเคลือบค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติของขนมข้าวอบกรอบอะราระห์มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบอะราระห์ที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่ผสมกรดไขมันมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งคล้ายแก้ว ซึ่งตัวอย่างจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบ เปราะ ไปเป็นของแข็งคล้ายยางที่เนื้อสัมผัสแข็งเหนียว ซึ่งเป็นลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบที่ผู้บริโภคไม่ต้องการที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงกว่าขนมข้าวอบกรอบอะราระห์เคลือบด้วยสารเคลือบไม่ผสมลิพิด

นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำอิสระที่ระดับต่างๆ กับปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นของขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆ มาวิเคราะห์โดยใช้สมการไอโซเทอมดูดซับความชื้นทั้ง 2 สมการ คือ แบบจำลองของ Guggenheim Anderson de Boer (GAB) และ Brunauer – Emmett – Teller (BET) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า Root mean square error (RMSE; R^2) ซึ่งบ่งบอกถึงความแม่นยำของการใช้แบบจำลองในการทำนายค่าการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่า R^2 ของสมการของ GAB มีค่า สูงกว่าสมการของ BET ทั้งนี้เนื่องจากสมการของ BET เหมาะสมที่จะนำมาทำนาย moisture sorption ได้ในช่วงค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.11-0.55 เท่านั้น เนื่องจากค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่มากกว่า 0.5 สมการของ BET จะไม่เป็นเส้นตรง โดยกราฟจะมีแนวโน้มที่มีความชันมากขึ้น ทำให้ค่าสหสัมพันธ์ลดลง ส่วนสมการของ GAB สามารถใช้ทำนายค่า moisture sorption ได้ในช่วง ค่าวอเตอร์แอกติวิตีตั้งแต่ 0.11-0.75 (Labuza และคณะ, 1985) แสดงให้เห็นว่าสมการของ GAB เป็นสมการที่เหมาะสมมากกว่าที่จะนำมาใช้อธิบายค่าการดูดซับความชื้นของขนมข้าวอบกรอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สิริกานต์ (2553) ที่ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอมของขนมข้าวอบกรอบอะราระห์ และ Siripatrawan และคณะ (2006) ที่ศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอมของขนมอบกรอบจากข้าวหอมมะลิ จึงนำข้อมูลที่ได้จากสมการของ GAB มาคำนวณเพื่อหาค่าความชื้นในระดับชั้นโมโนเลเยอร์ (M_0) ต่อไป



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น (ร้อยละน้ำหนักแห้ง) และวอเตอร์แอกติวิตี้ของขนมข้าวอบกรอบเคลือบสารเคลือบไม่ผสมลิติน, เคลือบสารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2 และเคลือบสารเคลือบสตาร์ช:กรดสเดียริก 1:0.2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

- หมายเหตุ
- ◆ หมายถึง สารเคลือบไม่ผสมลิติน
 - ▲ หมายถึง สารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2
 - หมายถึง สารเคลือบสตาร์ช:กรดสเดียริก 1:0.2

ปริมาณความชื้นระดับชั้น โมโนเลเยอร์ (M_0) เป็นปริมาณน้ำหรือปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับไว้รอบๆ อาหารเป็นฟิล์มบางๆ เพียงชั้นเดียว มีคุณสมบัติเป็นส่วนหนึ่งของอาหารที่มีความคงตัวมากไม่ว่าที่อุณหภูมิใดๆ ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ น้ำในส่วนนี้จะถูกยึดแน่นมาก ไม่เกิดประโยชน์หรือเกิดประโยชน์น้อยมากในการทำปฏิกิริยาต่างๆ หากอาหารมีค่าความชื้นระดับโมโนเลเยอร์มากแสดงว่ามีบริเวณที่สามารถทำปฏิกิริยา (active site) กับโมเลกุลน้ำมาก (Siripatrawan และคณะ, 2006) ซึ่งจากตารางที่ 4 พบว่าค่า M_0 ที่บ่งบอกถึงปริมาณความชื้นในระดับโมโนเลเยอร์ของแบบจำลอง GAB ของตัวอย่างที่เคลือบสารเคลือบที่ผสมกรดไขมันจะมี M_0 ต่ำกว่าตัวอย่างที่เคลือบสารเคลือบไม่ผสมกรดไขมัน แสดงให้เห็นว่าขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบสาร

เคลือบผสมกรดไขมันมีบริเวณที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำน้อยกว่า เนื่องจากในองค์ประกอบของสารเคลือบมีส่วนผสมของกรดไขมันซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic property) ไม่สร้างพันธะกับน้ำจึงทำให้มีปริมาณความชื้นที่ระดับชั้นโมโนเลเยอร์ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกันกับความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มในการทดลองเบื้องต้น

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของขนมข้าวอบกรอบที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ GAB และ BET และค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติของขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Model	ตัวอย่างเคลือบ สารเคลือบไม่ ผสมลิพิด	ตัวอย่างเคลือบ สารเคลือบผสม กรดปาล์มมีติก20%	ตัวอย่างเคลือบ สารเคลือบผสม กรดสเตียริก20%
GAB			
C_1	17.0981	21.7468	61.188
K	0.8774	0.8924	0.8992
M_0	4.9807	4.4962	4.5634
R^2	0.9834	0.9863	0.9827
BET			
C	25.9753	52.8541	311.2177
M_0	5.4716	5.053	5.1711
R^2	0.9665	0.9504	0.9795
ค่าวอเตอร์แอกติวิตีวิกฤติ	0.4875	0.5320	0.4925

M_0 = ปริมาณความชื้นที่โมโนเลเยอร์ (กรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมของแข็ง)

C = ค่าคงที่ของแบบจำลอง

K = ค่าคงที่ของสมการ GAB

R^2 = Root mean square error

4.2.2 สมบัติทางกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ

(ก.) ปริมาตรจำเพาะ

ปริมาตรจำเพาะของขนมข้าวอบกรอบ ผลแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบมีค่าปริมาตรจำเพาะประมาณ $1.96 \text{ cm}^3/\text{g}$ และเมื่อนำขนมมาเคลือบสารเคลือบสูตรต่างๆ ทั้งที่ผสมลิพิดและไม่ผสมลิพิด พบว่าปริมาตรจำเพาะของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) โดยพบว่าขนมข้าวอบกรอบมีปริมาตรจำเพาะในช่วง $1.45\text{-}1.48 \text{ cm}^3/\text{g}$ เนื่องจากการยุบตัวของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบ (ภาพที่ 28) ซึ่งในระหว่างการอบแห้งขนมข้าวอบกรอบมีสถานะคล้ายยาง ซึ่งมีปริมาตรอิสระในชั้นขนมมาก เกิดช่องว่างที่จำเป็นในการเคลื่อนที่ของน้ำ และเมื่อได้รับความร้อนน้ำที่อยู่ภายในจึงสามารถระเหยหรือระเหิดออกมาได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้ผนังเซลล์ยุบตัวลงมา ทำให้ชั้นอาหารหดเล็กลง โดยปริมาตรของการหดตัวของอาหารที่มีลักษณะคล้ายยางระหว่างการอบแห้งนี้จะเทียบเท่ากับปริมาตรน้ำที่ถูกกำจัดออกไป (สวนิต, 2556) ซึ่งต่างจากผลการทดลองของสิริ-กานต์ (2553) ที่เคลือบขนมข้าวอบกรอบด้วยสารเคลือบจากสตาร์ชตัดแปรที่มีความหนืดค่อนข้างต่ำ ในขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบจึงมีการใช้ปริมาณของสตาร์ชค่อนข้างมาก (ร้อยละ 13 โดยน้ำหนักแห้ง) และใช้ปริมาณน้ำน้อยทำให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในสารเคลือบสูง จึงไม่เกิดการยุบตัวของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบ

(ข.) ค่าร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนผลิตภัณฑ์

ค่าร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนขนมข้าวอบกรอบเมื่อใช้สารเคลือบสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าเมื่อใช้สารเคลือบสูตรต่างๆ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบที่ผสมลิพิดทั้งกรดปาล์มมีติกหรือกรดสเตียริก พบว่ามีแนวโน้มสูงกว่าขนมข้าวอบกรอบซึ่งใช้สารเคลือบที่ไม่ผสมลิพิด เนื่องจากสารเคลือบที่มีการผสมลิพิดมีความหนืดมากกว่าเล็กน้อย (ปัทมา และ จุฑาภรณ์, 2555) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของสิริกานต์ (2553) ที่ทำการศึกษาค่าร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนขนมข้าวอบกรอบเปรียบเทียบสารเคลือบที่ไม่ผสมลิพิดกับสารเคลือบสูตรผสมลิพิดหรือลิพิดผสมอิมัลซิไฟเออร์ พบว่าค่าร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนขนมข้าวอบกรอบของสารเคลือบที่ไม่ผสมลิพิดมีค่าต่ำกว่าขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบสูตรผสมลิพิดหรือลิพิดผสมอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งมีความหนืดมากกว่า ทั้งนี้ความหนืดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคของ

ไขมันที่ผสมลงไปเกิดการเบียดเสียดกันทำให้มีการต้านทานการไหลมากขึ้น (Jumaa และ Muller, 1988)

ตารางที่ 5 ปริมาตรจำเพาะ (cm^3/g) และร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบของขนมข้าวอบกรอบ สูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	ปริมาตรจำเพาะ (cm^3/g)	ร้อยละการเกาะติดของสาร เคลือบบนผลิตภัณฑ์
ก่อนเคลือบ	1.96 ± 0.20^a	- ^{1/}
สารเคลือบไม่ผสมลิพิด	1.48 ± 0.20^b	2.66 ± 0.28^a
สารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2	1.47 ± 0.05^b	3.01 ± 0.09^a
สารเคลือบสตาร์ช:กรดสเตียริก 1:0.2	1.45 ± 0.20^b	3.20 ± 0.08^a

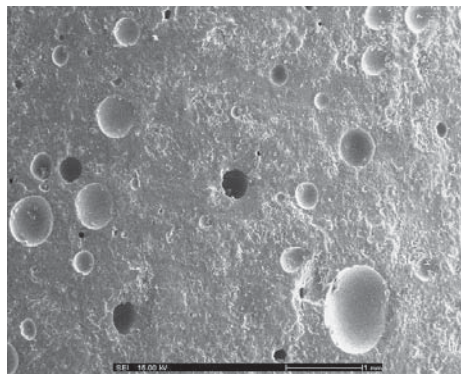
^{1/} ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

(ค.) ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างภาคตัดขวางของขนมข้าวอบกรอบ

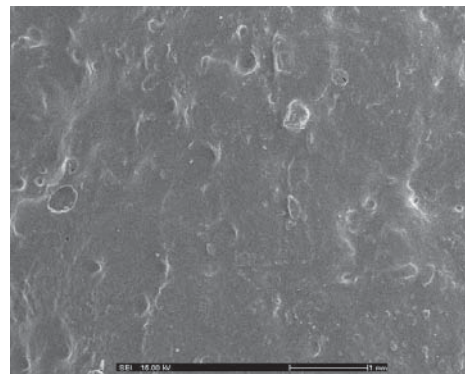
การศึกษาลักษณะพื้นผิวของขนมข้าวอบกรอบหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบนั้นสามารถอธิบายความเรียบ และความสม่ำเสมอของสารเคลือบที่เคลือบบนผิวของขนมข้าวอบกรอบ ส่วนการศึกษาโครงสร้างภาคตัดขวางนั้นทำให้ทราบความหนาโดยประมาณของชั้นสารเคลือบ ซึ่งความสม่ำเสมอและความหนาของสารเคลือบนั้นล้วนแล้วแต่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ (สิริกานต์, 2553)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบทั้งสูตรที่ไม่มี การผสมลิพิด สารเคลือบสตาร์ชต่อกรดปาล์มมิติก เท่ากับ 1 ต่อ 0.2 และสารเคลือบสตาร์ชต่อกรด สเตียริก เท่ากับ 1 ต่อ 0.2 ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 20 เท่า และ 200 เท่า (แสดงในภาพที่ 15 และ 16 ข, ค และ ง ตามลำดับ) พบว่ามีลักษณะพื้นผิวที่เรียกว่าขนมข้าว อบกรอบก่อนเคลือบสารเคลือบ ไม่พบรูพรุนบนพื้นผิวของขนม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนม ข้าวอบกรอบที่เคลือบสารเคลือบสูตรต่างๆ พบว่า ขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบไม่ ผสมลิพิดนั้นมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอกว่าสารเคลือบที่ผสมด้วยกรดปาล์มมิติกและกรด สเตียริก ทั้งนี้เนื่องจากสารเคลือบที่ผสมกรดปาล์มมิติกและกรดสเตียริกนั้นมีความหนืดมากกว่า เล็กน้อย (ปัทมา และ จุฑาภรณ์, 2555) นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นผลึกสีขาวบนพื้นผิวของ ขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่ผสมกรดสเตียริกกระจายอยู่บางส่วน เนื่องจากกรด สเตียริกมีสถานะเป็นของแข็ง ณ อุณหภูมิที่ทำการเคลือบ (68 ± 3 องศาเซลเซียส)

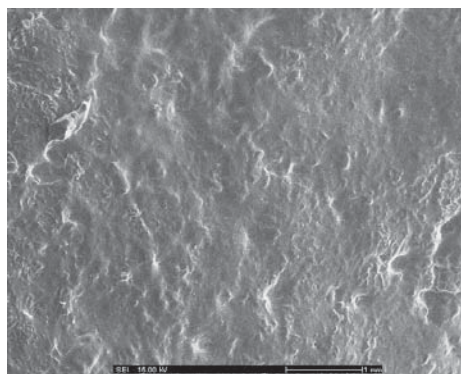
การศึกษาโครงสร้างภาคตัดขวางด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 250 เท่า และ 1000 เท่า ของขนมข้าวอบกรอบสูตรต่างๆ แสดงดังภาพที่ 17 และ 18 พบว่าขนมข้าวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบทุกสูตรสามารถสังเกตเห็นชั้นของสารเคลือบได้ชัดเจน โดยสารเคลือบทุกสูตรค่อนข้างหนา และมีความหนาของชั้นสารเคลือบใกล้เคียงกัน (อยู่ในช่วง 18-30 μm) และสารเคลือบสามารถปิดรูพรุนของชั้นขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบได้ทั่วถึง



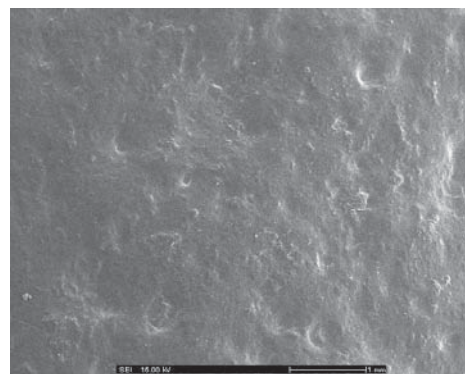
(ก)



(ข)

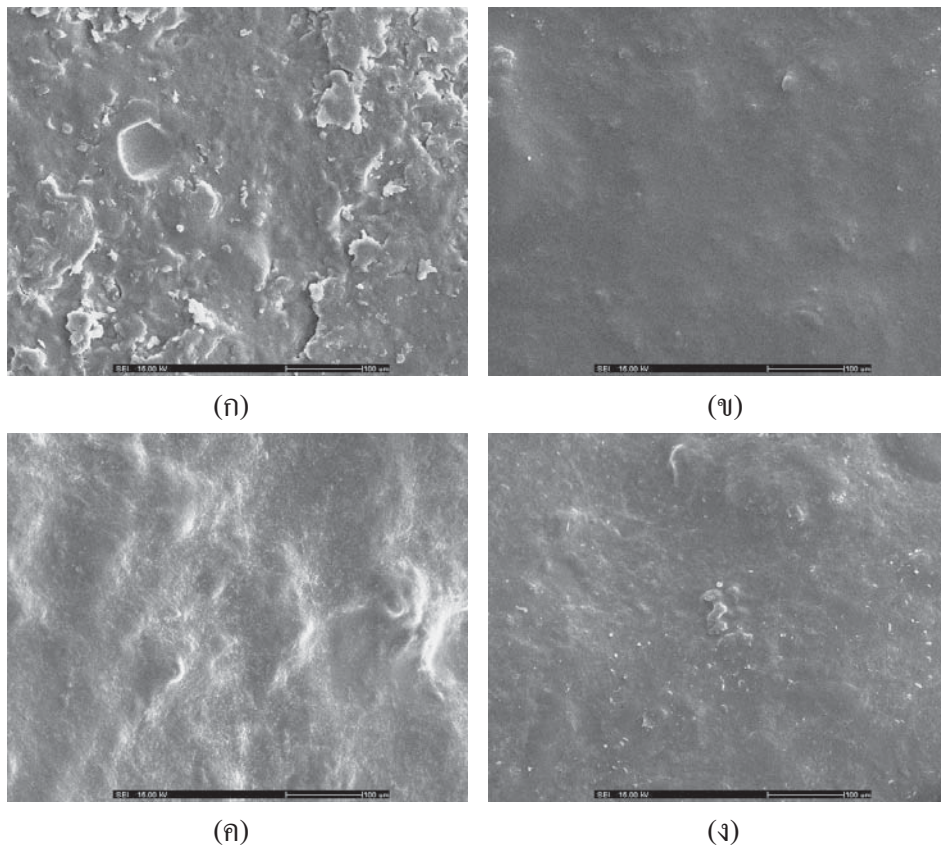


(ค)

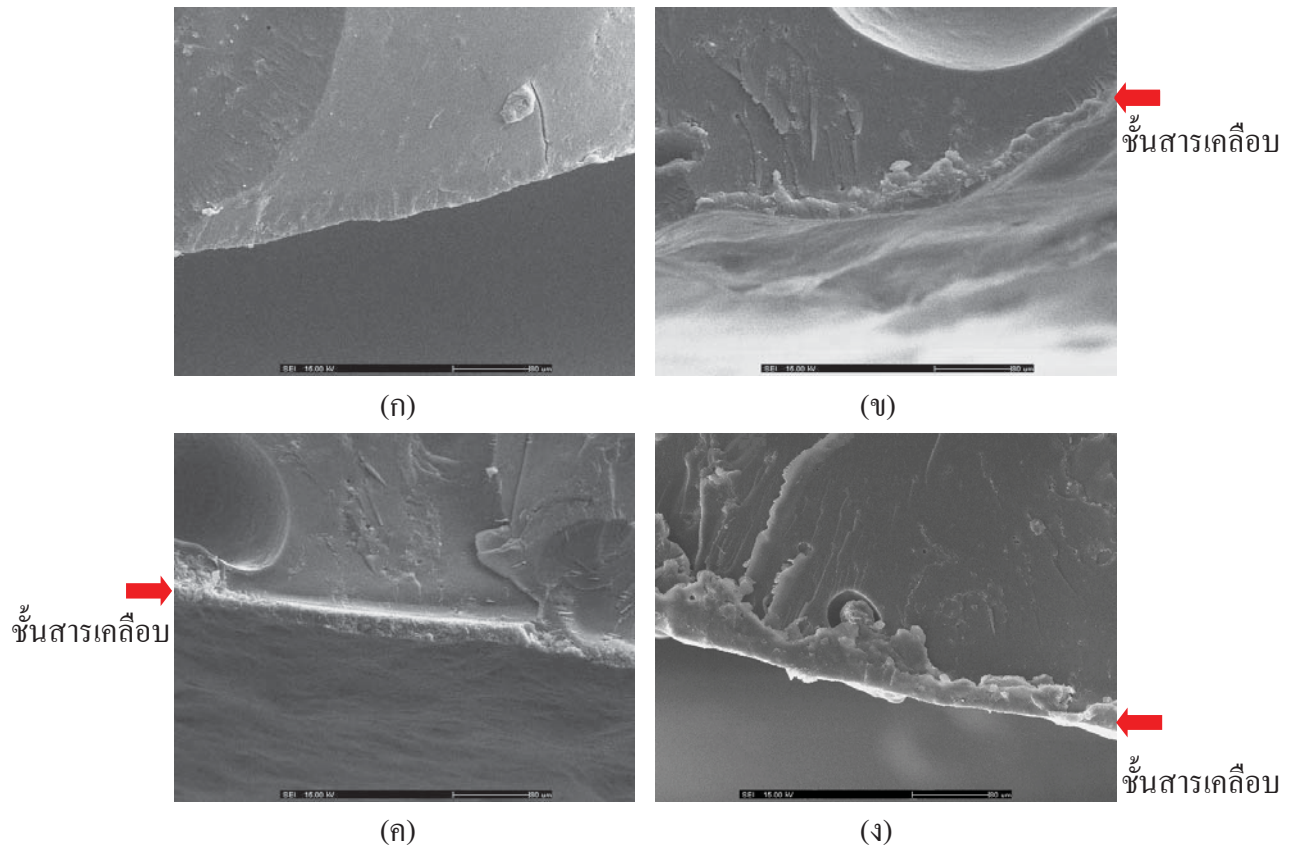


(ง)

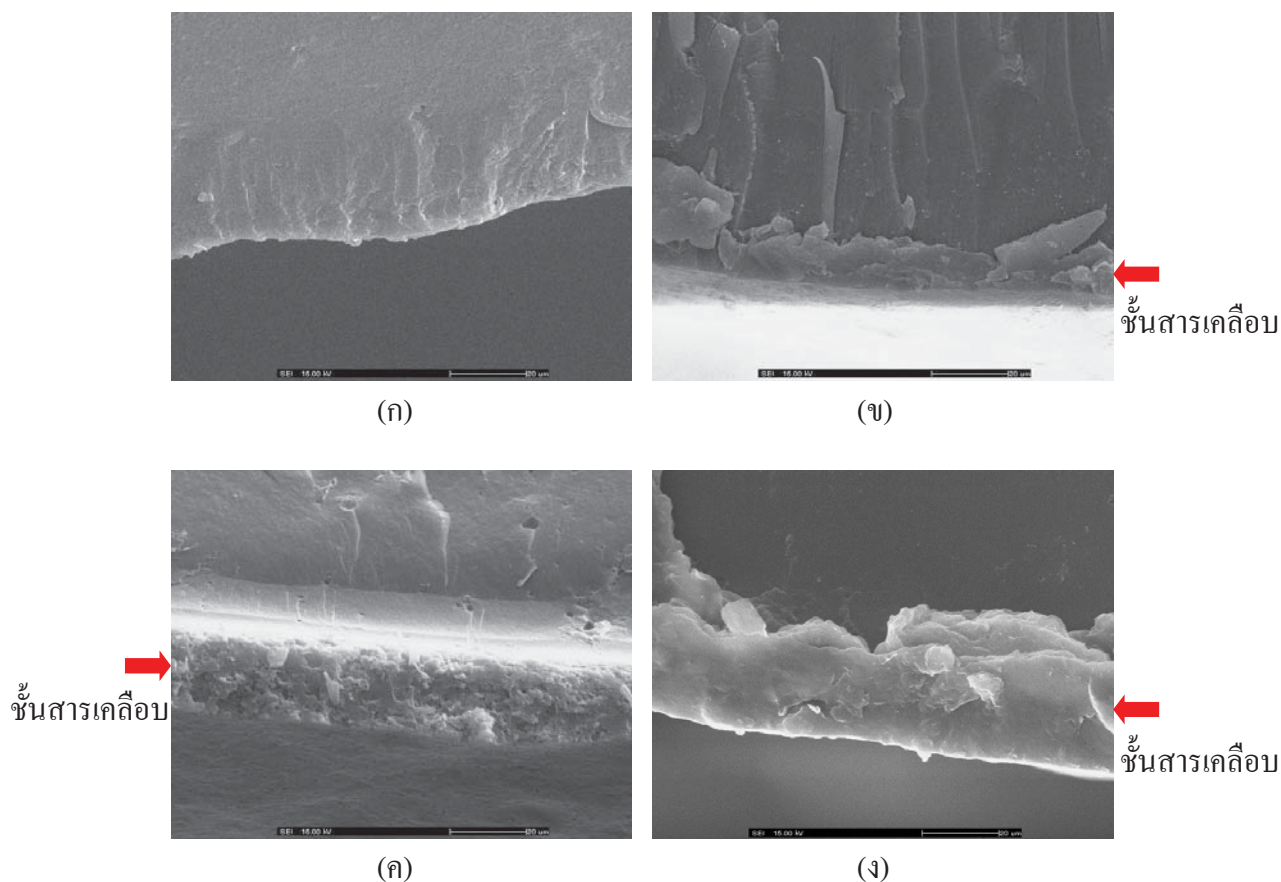
ภาพที่ 15 ลักษณะพื้นผิว ทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบ (ก), เคลือบสารเคลือบไม่ผสมลิพิด (ข), เคลือบสารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2 (ค) และ เคลือบสารเคลือบสตาร์ช:กรดสเดयरิก 1:0.2 (ง) ที่กำลังขยาย 20 เท่า



ภาพที่ 16 ลักษณะพื้นผิว ทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบ (ก), เคลือบสารเคลือบไม่ผสมลิพิด (ข), สารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2 (ค) และ สารเคลือบสตาร์ช:กรดสเตียริก 1:0.2 ที่กำลังขยาย 200 เท่า



ภาพที่ 17 โครงสร้างภาคตัดขวาง ทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของขนมข้าว
 อบกรอบก่อนเคลือบ (ก), เคลือบสารเคลือบไม่ผสมลิพิด (ข), เคลือบสารเคลือบสตาร์ช:
 กรดปาล์มมีติก 1:0.2 (ค) และ เคลือบสารเคลือบสตาร์ช:กรดสเตียริก 1:0.2 (ง) ที่
 กำลังขยาย 250 เท่า



ภาพที่ 18 โครงสร้างภาคตัดขวาง ทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ของขมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบ (ก), สารเคลือบไม่ผสมลิวพิท (ข), สารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์ม มิติก 1:0.2 (ค) และ สารเคลือบสตาร์ช:กรดสเตียริก 1:0.2 (ง) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

(ง.) ลักษณะเนื้อสัมผัส และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของขมข้าวอบกรอบก่อนและหลังเคลือบ

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นลักษณะคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ขมขบเคี้ยว มีผลต่อพฤติกรรมการบริโภค รวมไปถึงแรงที่ใช้ในการกัด เคี้ยวโดยขากรรไกรและฟัน โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่แข็ง เหนียวนั้นจะไม่ใช่ที่ยอมรับของผู้บริโภค ลักษณะเนื้อสัมผัสจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี, โครงสร้าง และสมบัติการไหล (rheological properties) ของส่วนประกอบ (Surówka, 2002) ลักษณะเนื้อสัมผัสเกิดจากหลายปัจจัยและมนุษย์สามารถรับรู้ได้จากการสัมผัส, การมองเห็น และการได้ยิน ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตามการทดสอบทางประสาทสัมผัสก็มีข้อเสียที่ไม่พบในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ นั่นคือ การใช้เครื่องมือวิเคราะห์นั้นใช้เวลาน้อย, ราคาไม่แพง และไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะ

อารมณ์ของผู้ทดสอบ (Surówka, 2002) การทดสอบด้วยเครื่องมือเป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของวัตถุโดยใช้แรงและความเร็ว การตีความความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุนั้นเป็นเรื่องยาก เนื่องจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์นั้นมีความซับซ้อน แต่การทดสอบทางประสาทสัมผัสสามารถอธิบายความแตกต่างได้มากกว่าโดยผู้ชิม เช่น ผู้ชิมสามารถแยกออกได้ว่าเป็นลักษณะของความกรอบกรอบ (crunchy) หรือ ความกรอบ (crispy) ได้ในผลิตภัณฑ์เดียวกัน เป็นต้น (Peleg, 1994)

Lewicki และคณะ (2007) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของคอนเฟล็กซ์โดยใช้เครื่องมือพร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือกับสมบัติทางการได้ยินเสียง (acoustic properties) แล้วพบว่า เสียงที่เกิดขึ้นจากการกัดตัวอย่างสัมพันธ์นั้นกับความกรอบ Lewicki และคณะ (2007) ได้นิยาม ความกรอบ (crispness) หมายถึง แรงที่ทำให้เกิดจุดหักแรกของกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของคอนเฟล็กซ์ ส่วนความแข็งนั้นเป็นค่าแรงสูงสุด

จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบก่อนและหลังเคลือบสารเคลือบทดสอบด้วยเครื่อง Texture Analyzer ได้ผลดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าแรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างแตกในครั้งแรกจากการทดสอบด้วยเครื่อง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในเชิงตรงกันข้าม (-0.952) (ตารางที่ 21) กับค่าความเปราะที่ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี General Quantitative Descriptive Analysis โดยผู้บริโภครที่ได้รับการฝึกฝนจำนวน 10 คน ซึ่งแสดงในตารางที่ 7 นั่นคือ ขนมข้าวอบกรอบที่มีค่าความเปราะจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสมาก จะใช้แรงในการกัดตัวอย่างให้แตกในครั้งแรกน้อย ส่วนขนมข้าวอบกรอบที่มีค่าความเปราะจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสน้อย จะใช้แรงในการกัดตัวอย่างให้แตกในครั้งแรกมาก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเคลือบขนมข้าวอบกรอบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ ขนมข้าวอบกรอบมีความเปราะเพิ่มขึ้นจากขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจาก บริเวณพื้นผิวของขนมข้าวอบกรอบมีความขรุขระมาก และอาจมีผงของขนมอยู่ที่ผิวหน้า ซึ่งความขรุขระหรือผิวหน้าที่ไม่สะอาดนี้ทำให้พันธะระหว่างสารเคลือบและผิวหน้าของขนมไม่แข็งแรงจึงเกิดการแตกหักได้ง่ายเมื่อมีแรงเพียงเล็กน้อยมากกระทำ (Suresh และ Mortensen, 1998) และส่งผลให้ค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบลดลงจากตัวอย่างก่อนเคลือบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงกดสูงสุดซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Texture Analyzer พบว่าขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบสารเคลือบสูตรต่างๆ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยสอดคล้องกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านความแข็ง

ผลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าความเปราะ ความแข็งและความเหนียวติดปากติดฟันของสารเคลือบแต่ละสูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 6 แรงที่ใช้ในการทำให้อย่างแตกในครั้งแรก, แรงกดสูงสุด ทดสอบด้วยเครื่อง Texture analyzer

ตัวอย่าง	แรงที่ใช้ในการทำให้ อย่างแตกในครั้งแรก (นิวตัน)	แรงกดสูงสุด (นิวตัน)
ก่อนเคลือบ	27.70±0.81 ^a	49.95±1.16 ^a
สารเคลือบไม่ผสมลิพิด	7.56±0.50 ^c	33.02±0.69 ^b
สารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2	7.69±1.12 ^c	32.19±0.79 ^b
สารเคลือบสตาร์ช:กรดสเตียริก 1:0.2	11.68±0.77 ^b	31.37±1.21 ^b

ตารางที่ 7 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบด้านความเปราะ, ความแข็ง และความเหนียวติดปากติดฟัน ทดสอบด้วยวิธี Quantitative Descriptive Analysis โดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน

ตัวอย่าง	ความเปราะ	ความแข็ง	ความเหนียวติดปากติด ฟัน
ก่อนเคลือบ	9.78±0.73 ^b	10.84±1.10 ^a	8.05±0.77 ^a
สารเคลือบไม่ผสมลิพิด	11.05±0.93 ^a	9.84±1.39 ^{ab}	8.53±1.07 ^a
สารเคลือบสตาร์ช:กรด ปาล์มมิติก 1:0.2	10.72±1.19 ^{ab}	9.05±1.60 ^b	8.48±0.92 ^a
สารเคลือบสตาร์ช:กรด สเตียริก 1:0.2	10.89±1.69 ^a	10.03±1.40 ^{ab}	8.48±1.10 ^a

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

1. फिल्मบริโกลได้จากสตาร์ชัดแปรออกเทนิลซัคซิเนตที่มีการผสมกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆจะมีค่า Tensile strength และ Elastic modulus ต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิด โดยฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกจะมีค่า Tensile strength และ Elastic modulus ต่ำที่สุด ส่วนฟิล์มที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัวมีค่า Elastic modulus ไม่แตกต่างกับฟิล์มที่ไม่ผสมลิพิด และฟิล์มที่ผสมกรดไขมันมีค่า %Elongation at break สูงกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมกรดไขมัน โดยฟิล์มที่มีการผสมกรดปาล์มมีติกในอัตราส่วน 0.2 ต่อ 1 มีค่า %Elongation at break สูงที่สุด
2. ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจากสตาร์ชัดแปรออกเทนิลซัคซิเนตต่ำลงเมื่อผสมกรดไขมันอิ่มตัวที่ระดับความเข้มข้นของกรดไขมันต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.2 ต่อ 1 แต่ที่ระดับความเข้มข้นของกรดไขมันต่อสตาร์ชเท่ากับ 0.1 ต่อ 1 และฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกนั้นไม่แตกต่างจากฟิล์มที่ไม่ผสมกรดไขมัน
3. ความชุ่มสัมพัทธ์กับความขรุขระที่ผิวหน้าของฟิล์ม ฟิล์มที่ไม่ผสมกรดไขมันมีความชุ่มและผิวหน้าขรุขระมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมกรดไขมัน ยกเว้นฟิล์มที่ผสมกรดโอเลอิกที่ระดับความเข้มข้น 0.2 ต่อ 1
4. ขนมห้ำวอบกรอบที่เคลือบสารเคลือบจากสตาร์ชัดแปรออกเทนิลซัคซิเนตที่ผสมกรดไขมันอิ่มตัว มีปริมาณความชื้นที่ระดับชั้นโมโนเลเยอร์ (M_0) ต่ำกว่า และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้วิกฤติ (critical water activity) สูงกว่าขนมห้ำวอบกรอบที่เคลือบสารเคลือบไม่ผสมกรดไขมัน
5. ขนมห้ำวอบกรอบที่เคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ มีค่าความเปราะ, ความแข็ง และ ความเหนียวติดปากติดฟัน จากการทดสอบโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนโดยวิธี General Quantitative Descriptive Analysis ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 292 หน้า
- ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. 2540. การศึกษาฟิล์มที่รับประทานได้จากโปรตีนถั่วเขียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิธิยา รัตนานพนธ์. 2551. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ. 504 หน้า.
- นิธิยา รัตนานพนธ์. 2541. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ถ่ายเอกสาร, 193 หน้า.
- ปัทมา ศรีธนาอุทัยกร และ จุฑาภรณ์ เชื้อสูง. 2555. สมบัติของอิมัลชันจากแป้งคัดแปรออกทีนิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ. จดนิพนธ์ปริญญาตรี. สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- พรพรรณ จันทร์ไตร. 2543. การปรับปรุงสมบัติความคงทนต่อการดูดซับน้ำของฟิล์มบริโกลด์จากแป้งมันสำปะหลังและการใช้ประโยชน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรณี พรประชาวุฒน์. 2554. การศึกษาเปรียบเทียบของค์ประกอบกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ และพฤติกรรมการตกผลึกของน้ำมันเมล็ดมะม่วงหลายสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วิราวัลย์ ทองอุ่นเรือน. 2554. ผลของโปรตีนกลูเตลินและไขมันต่อสมบัติของฟิล์มบริโกลด์จากสตาร์ชข้าวเจ้า และการประยุกต์ในการเคลือบมะม่วง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สิริกานต์ ชนะสาร โสภณ. 2553. การพัฒนาสารเคลือบผิวบริโกลด์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาขนมข้าวอบกรอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

- Andrade P., R.D., Lemus M., R. and Pérez C., C.E. 2011. Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*. 18(3): 325-334.
- AOAC. 1995. Association of Official Analytical Chemistry. Washington, D.C.: Association of Official Chemistry, Inc.
- Ayranci, E. and Tunc, S. 2001. The effect of fatty acid content on water vapour and carbon dioxide transmissions of cellulose-based edible. *Food Chemistry*. 72: 231-236.
- Bao, J., Xing, J., Phillips, D.L. and Corke, H. 2003. Physical properties of octenyl succinic anhydride modified rice, wheat, and potato starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51(8): 2283-2287.
- Bertuzzi, M.A., Castro Vidaurre, E.F., Armada, M. and Gottifredi, J.C. 2006. Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*. 80: 972-978.
- Bilgi, B. and Çelik, S. 2004. Solubility and emulsifying properties of barley protein concentrate. *European Food Research and Technology*. 218(5): 437-441.
- Bourtooma, T. and Chinnan, M.S. 2008. Preparation and properties of rice starch-chitosan blend Biodegradable film. *LWT - Food Science and Technology*. 41: 1633-1641.
- Brantner, H.P., Pippin, R., Prant, W., Bertini, S. and Lacroix, O. 2013. Fracture mechanical behavior of plasma-sprayed coatings.
- Bravin, B., Peressini, D. and Sensidoni, A. 2004. Influence of emulsifier type and content on functional properties of polysaccharide lipid-based edible films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52: 6448-6455.
- Bravin, B., Peressini, D. and Sensidoni, A. 2006. Development and application of polysaccharide-lipid edible coating to extend shelf-life of dry bakery products. *Journal of Food Engineering*. 76: 280-290.
- Chang, P.R., Qian, D., Anderson, D.P. and Ma, X. 2012. Preparation and properties of the succinic ester of porous starch. *Carbohydrate Polymers*. 88: 604-608.

- Colla, E., Sobral, P.J. and Menegalli, F. 2006. Amaranthus cruentus flour edible films: influence of stearic acid addition, plasticizer concentration, and emulsion stirring speed on water vapor permeability and mechanical properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54: 6645-6653.
- Das, D.K., Dutta, H. and Mahanta, C.L. 2013. Development of a rice starch-based coating with antioxidant and microbe-barrier properties and study of its effect on tomatoes stored at room temperature. *LWT - Food Science and Technology*. 50: 272-278.
- Dickinson, E. 1988. The role of hydrocolloids in stabilising particular dispersions and emulsions. In G. O. Phillipis, D. J. Wedlock, and P. A. Williams (Eds.), *Gums and Stabilisers for the Food Industry 4*. Oxford: IRL Press.
- Dokié, P., Dokié, L., Dapcevic, T. and Krstonosic, V. 2008. Colloid characteristics and emulsifying properties of OSA starches. *Progress in colloid and polymer science*. 135: 48-56.
- Fabra, M. J., Jiménez, A., Atarés, L., Talens, P., and Chiralt, A. 2009. Effect of fatty acids and beeswax addition on properties of sodium caseinate dispersions and films. *Biomacromolecules*. 10: 1500–1507.
- Fabra, M.J., Talens, P. and Chiralt, A. 2008. Tensile properties and water vapor permeability of sodium caseinate films containing oleic acid-beewax mixture. *Journal of Food Engineering*. 85: 393-400.
- Fabra, M. J., Talens, P. and Chiralt, A. 2010a. Water sorption isotherms and phase transitions of sodium caseinate lipid films as affected by lipid interactions. *Food Hydrocolloids*. 24: 384-391.
- Fabra, M. J., Talens, P. and Chiralt, A. 2010b. Influence of calcium on tensile, optical and water vapour permeability properties of sodium caseinate edible films. *Journal of Food Engineering*. 96: 356-364.
- Fabra, M. J., Talens, P. and Chiralt, A. 2010c. Properties of sodium caseinate films containing lipids. In S. Hollingworth (Ed.), *Food Hydrocolloids: Characteristics, Properties and Structures*. Hauppauge, NY, United States of America: Nova Science Publishers, Inc.

- Fang, G., Li, H., Chen, Z. and Liu, X. 2011. Preparation and properties of palmitic acid/SiO₂ composites with flame retardant as thermal energy storage materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 95: 1875–1881.
- Fang, G., Li, H., Cao, L. and Shan, F. 2012. Preparation and thermal properties of form-stable palmitic acid/active aluminum oxide composites as phase change materials for latent heat storage. *Materials Chemistry and Physics*. 137: 558-564.
- Fanta, G.F., Shogren, R.L. and Salch, J.H. 1999. Steam jet cooking of high-amylose starch–fatty acid mixtures. An investigation of complex formation. *Carbohydrate Polymers*. 38: 1–6.
- Floury, J., Desrumaux, A., Axelos, M.A.V. and Legrand, J. 2002. Degradation of methylcellulose during ultra-high pressure homogenization. *Food hydrocolloids*. 16: 47-53.
- García, M. A., Martino, M. N. and Zaritzky, N. E. 2000b. Lipid addition to improve barrier properties of edible starch-based films and coatings. *Journal of Food Science*, 65(6): 941-944.
- Ghasemloua, M., Khodaiyana, F., Oromiehieb, A. and Yarmanda, M.S. 2011. Characterization of edible emulsified films with low affinity to water based on kefirin and oleic acid. *International Journal of Biological Macromolecules*. 49: 378– 384.
- Ghanbarzadeh, B. and Almasi, H. 2011. Physical properties of edible emulsified films based on carboxymethyl cellulose and oleic acid. *International Journal of Biological Macromolecules*. 48: 44–49.
- Guan, Y.L., Liu, X.F., Zhang, Y.P., Yao, K.D., 1998. Study of phase behavior on chitosan/viscose rayon blend film. *Journal of Applied Polymer Science*. 67: 1965–1972.
- Hagenmaier, R. D. and Shaw, P. E. 1990. Moisture permeability of edible films made with fatty acid and (hydroxypropyl) methylcellulose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 38(9): 1799-1803.
- Hambleton, A., Debeaufort, F., Beney, L., Karbowski, T. and Voilley, A. 2008. Protection of active aroma compound against moisture and oxygen by encapsulation in biopolymeric emulsion-based edible films. *Biomacromolecules*. 9(3):1058-1063.

- Hamada, Y. 2005. Method for applying sauce and method for manufacturing rice cracker, US Patent, 6, 890, 573.
- Hayati, T.O. and Casimir, C.A. 2004. Effect of emulsifier type, droplet size, and oil concentration on lipid oxidation in structured lipid-based oil-in-water emulsions. *Food Chemistry*. 84: 451-456.
- Hu, X., Weia, B., Zhanga, B., Xub, X., Jin, Z. and Tian, Y. 2013. Synthesis and characterization of dextrin monosuccinate. *Carbohydrate Polymers*. 97: 111– 115.
- Jiménez, A., Fabra, M.J., Talens, P. and Chiralt, A. 2010. Effect of lipid self-association on the microstructure and physical properties of hydroxypropyl-methylcellulose edible films containing fatty acids. *Carbohydrate Polymers*. 82: 585–593.
- Jiménez, A., Fabra, M.J., Talens, P. and Chiralt, A. 2012. Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids. *Food Hydrocolloids*. 26: 302-310.
- Jumaa, M. and Muller, B.W. 1998. The effect of oil components and homogenization conditions on the physicochemical properties and stability of parenteral fat emulsions. *International Journal of Pharmaceutics*. 163: 81–89.
- Karbowiak, T., Debeaufort, F. and Voilley, A. 2007. Influence of thermal process on structure and functional properties of emulsion-based edible films. *Food Hydrocolloids*. 21: 879–888.
- Kong, S., Zhang, P., Wen, X., Pi, P., Chenga, J., Yang, Z and Hai, J. 2008. Influence of surface modification of SrFe₁₂O₁₉ particles with oleic acid on magnetic microsphere preparation. *Particuology*. 6: 185–190.
- Krochta, J. M. 1990. Emulsion films on food products to control mass transfer. *AIChE journal*. 86:57-61.
- Krochta, J. M., Baldwin, E.A. and Carriedo-Nisperos, M.O. 1994. *Edible Coatings and Films to Improve Food Quality*. Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania.
- Krochta, J. M. and McHugh, T. H. 1994. Dispersed phase particle size effects on water vapor permeability of whey protein-beeswax edible emulsion films. *Journal of Food Process and Preservation*. 18: 173-188.

- Kulchan, R., Boonsupthip, W. and Suppakul, P. 2010. Shelf life prediction of packaged cassava-flour-based baked product by using empirical models and activation energy for water vapor permeability of polyolefin films. *Journal of Food Engineering*. 100(3): 461–467.
- Labuza, T. P. and Hyman, C. R. 1998. Moisture migration and control in multi-domain foods. *Trends in Food Science and Technology*. 9: 47–55.
- Lacaze, G., Wick, M. and Cappelle, S. 2007. Emerging fermentation technologies: Development of novel sourdoughs. *Food Microbiology*. 24:155–160.
- Lewicki, P.P., Marzec, A. and Kuropatwa, M. 2007. Influence of water activity on texture of corn flakes. *Acta Agrophysica*. 9(1): 79-90.
- Lourdin, D., Valle, G.D. and Colonna, P. 1995. Influence of amylose content on starch films and foams. *Carbohydrate Polymers*. 27: 261-270.
- Martin-Polo, M.O., Mauguin, C. and Voilley, A. Hydrophobic films and their efficiency against moisture transfer. 1. Influence of the film preparation technique. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 40: 407–412.
- Maftoonazad, N., Ramaswamy, H.S. and Marcotte, M. 2007. Evaluation of factors affecting barrier, mechanical and optical properties of pectin-based films using response surface methodology. *Journal of Food Process Engineering*. 30: 539–563.
- McClements, D. J. 2005. Interfacial properties and their characterization. In D. J. McClements (Ed.), *Food Emulsions. Principles Practices and Techniques* (pp.175-232). Boca Raton: CRC Press.
- Mc Hugh, T. H. and Krochta, J. M. 1994. Water vapour permeability properties of edible whey protein-lipid emulsion films. *Journal of the American Oil Chemists’ Society*. 71: 307-312.
- Monedero, F. M., Fabra, M. J., Talens, P. and Chiralt, A. 2009. Effect of oleic acid-beeswax mixtures on mechanical, optical and barrier properties of soy protein isolate based films. *Journal of Food Engineering*. 91(4): 509-515.
- Nawar, W.W. 1996. Lipid. In O.R. Fennema (Ed.) *Food Chemistry*. 3rd ed. (pp.215-319) Marcel Dekker, Inc., New York.

- Peleg M. 1994. A mathematical model of crunchiness crispness loss in breakfast cereals. *Journal of Texture Studies*. 25. 403-410.
- Lewicki, P.P., Marzec, A. and Kuropatwa, M. 2007. Influence of water activity on texture of corn flakes. *Acta Agrophysica*. 9(1): 79-90.
- Rhim, J., Wu, Y., Weller, C. L. and Schnepf, M. 1999. Physical characteristics of emulsified soy proteinefatty acid composite films. *Sciences des Aliments*. 19(1): 57-71.
- Romero-Bastida, C. A., Bello-Prez, L. A., Garcia, M. A., Martino, M. N., Solorza-Feria, J. and Zaritzky, N. E., 2005. Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches. *Carbohydrate Polymers*. 60(2): 235-244.
- Sánchez-González, L., González-Martínez, C., Chiralt, A. and Cháfer, M. 2010. Physical and antimicrobial properties of chitosane-tea tree essential oil composite films. *Journal of Food Engineering*, 98: 443-452.
- Sherwin, C.P., Smith, D.E. and Fulcher, R.G. 1998. Effect of Fatty Acid Type on Dispersed Phase Particle Size Distributions in Emulsion Edible Films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46: 4534-4538.
- Shogren, R.L., Viswanathan, A., Felker, F. and Gross, R.A. 2000. Distribution of octenyl succinate groups in octenyl succinic anhydride modified waxy maize starch. *Food Chemistry*. 52(6-7):196-204.
- Singh, J., Singh, N. and Saxena, S. K. 2002. Effect of fatty acids on the rheological properties of corn and potato starch. *Journal of Food Engineering*. 52(1): 9-16.
- Siripatrawan, U. and Jantawat, P. 2006. Determination of moisture sorption isotherm of Jasmine Rice Cracker Using BET and GAB models. *Food Science and Technology International*. 12(6): 459-465.
- Song, X., He, G., Ruan, H. and Chen, Q. 2006. Preparation and properties of octenyl succinic anhydride modified early indica rice starch. *Food Chemistry*. 58(2): 109-117.
- Surówka, K. 2002. Food texture and methods of its study (in Polish). *Przemysł Spożywczy*. 10: 12-17.

- Sweedmana, M.C., Tizzotti, M.J., Schäferb, C. and Gilbert, R.G. 2013. Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches: A review. *Carbohydrate Polymers*. 92: 905– 920.
- Tanaka, M., Ishizaki, S., Suzuki, T. and Takai, R. 2001. Water vapour permeability of edible films prepared from fish water soluble proteins as affected by lipid type. *Journal of the Tokyo University of Fisheries*. 87: 31-37.
- Tarazaga, M.N., Miguel, D.R., Krochta, J. M. and Perez-Gago, M.B. 2008. Fatty Acid Effect on Hydroxypropyl Methylcellulose-Beeswax Edible Film Properties and Postharvest Quality of Coated 'Ortanique' Mandarins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56: 10689–10696.
- Teixeira, A.C.T., Garcia, A.R., Ilharcob, L.M., GonÇalves da Silva, A.M.P.S. and Fernandes, A. C. 2010. Phase behaviour of oleanolic acid, pure and mixed with stearic acid: Interactions and crystallinity. *Chemistry and Physics of Lipids*. 163: 655–666.
- Valenzuela, C., Abugoch, L. and Tapia, C. 2013. Quinoa protein chitosan sunflower oil edible film: Mechanical, barrier and structural properties. *LWT - Food Science and Technology*. 50:531-537.
- Villalobos, R., Chanona, J., Herna´ndez, P., Gutie´rrez, G. and Chiralt, A. 2005. Gloss and transparency of hydroxypropyl methylcellulose films containing surfactants as affected by their microstructure. *Food Hydrocolloids*. 19: 53–61.
- Whistler, R. L. and BeMiller, J. N. 1997. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*. USA. 241 pages.
- Wittaya, T. 2009. Microcomposites of rice starch film reinforced with microcrystalline cellulose from palm pressed fiber. *International Food Research Journal*. 16: 493-500.
- Xu, Y.X., Kim, K.M., Hanna, M.A. and Nag, D. 2005. Chitosan–starch composite film: preparation and characterization. *Industrial Crops and Products*. 21:185–192.
- Yin, Y.J., Yao, K.D., Cheng, G.X., Ma, J.B., 1999. Properties of polyelectrolyte complex films of chitosan and gelatin. *Polymer International*. 48: 429–433.
- Yoshida, C.M.P. and Antunes, A.J. 2004. Characterization of whey protein emulsion films. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2: 261–264.

Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B. and Sedaghat, N. 2010. Physical properties of edible emulsified films based on pistachio globulin protein and fatty acids. *Journal of Food Engineering*. 100:102–108.

www.pherobase.com (เข้าถึงเมื่อ 15/11/2556)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีการเตรียม

วิธีการเตรียม

1. การเตรียมฟิล์มบริโกลได้จากสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต (สูตรควบคุม ประกอบด้วยสตาร์ช 2.5%+ ซอร์บิทอล)

1.1 วิธีคำนวณ

- ชั่งสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม
- ชั่งซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม
- ชั่งน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

เตรียมสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณ 700 กรัม

สารละลาย	100 กรัม	มีสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต	2.5	กรัมโดยน้ำหนักแห้ง
สารละลาย	700 กรัม	มีสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต	$\frac{2.5 \times 700}{100} = 17.5$	กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

เนื่องจาก สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต มีความชื้น 12.07 โดยน้ำหนักแห้ง เพราะฉะนั้น

สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต 100 กรัม มีน้ำอยู่ 12.07 กรัม มีสตาร์ชอยู่ 87.93 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

ถ้าต้องการสตาร์ช 87.93 กรัม ต้องชั่งสตาร์ชมา 100 กรัม

ถ้าต้องการสตาร์ช 17.5 กรัม ต้องชั่งสตาร์ชมา $\frac{17.5 \times 100}{87.93} = 19.90$ กรัม

ซอร์บิทอลใช้ความเข้มข้น 40%total solid นั่นคือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม มาจากสตาร์ช 60 กรัม และซอร์บิทอล 40 กรัม

ถ้าสตาร์ช 60 กรัม ใช้ซอร์บิทอล 40 กรัม

ถ้าสตาร์ช 17.5 กรัม ใช้ซอร์บิทอล $\frac{17.5 \times 40}{60} = 11.67$ กรัม

เนื่องจากซอร์บิทอลมีปริมาณของแข็งที่วัดได้ 70 °Brix เพราะฉะนั้น

ถ้าต้องการซอร์บิทอล 70 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ต้องชั่งซอร์บิทอล 100 กรัมโดยน้ำหนักเปียก

ถ้าต้องการซอร์บิทอล 11.67 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ต้องชั่งซอร์บิทอล $\frac{11.67 \times 100}{70} = 16.67$ กรัมโดยน้ำหนักเปียก

เตรียมสารละลายทั้งหมด 700 กรัม ดังนั้นต้องผสมน้ำ = 700 - (19.90 + 16.67) = 663.43 กรัม

1.2 วิธีการเตรียม

1. เตรียมสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอกทีนิน (สตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอกทีนิน, Non-Crystallizing sorbitol 40 %(total solid) และน้ำกลั่น) โดยที่สารละลายทั้งหมดมีน้ำหนัก 700 กรัม
 2. ผสมให้เข้ากันด้วย magnetic bar ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และให้ความร้อนด้วย hot plate ปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
 3. นำไปผ่านเครื่อง High pressure Homogenizer ที่ระดับความดัน 300/30 bar
 4. กำจัดฟองอากาศภายในสารละลายด้วยเครื่องกำจัดฟองก๊าซ (sonicator, ยี่ห้อ CREST TRU-SWEEPTM, รุ่น 275DAE) ระดับ 8 เป็นเวลา 20 นาที ได้เป็นสารเคลือบอิมัลชัน
 5. เทสารละลายฟิล์มบริโกลด์ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 0.50 กรัม / เฟลทใน plastic plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ในระหว่างเทสารละลายควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วง 75 ± 5 องศาเซลเซียส
 6. ทำให้แห้งที่สภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ± 5 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
 7. นำตัวอย่างฟิล์มที่แห้งแล้วไปเก็บรักษา ณ ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 53 ± 5 โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ด้วยสารละลายแมกนีเซียมไนเตรตอิ่มตัว อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกันนี้ 3 ซ้ำการทดลอง

2. การเตรียมฟิล์มบริโกลด์อิมัลชัน

2.1 วิธีการคำนวณ

2.1.1 สูตรผสมกรดโอเลอิก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.1 แบ่งเตรียมวัตถุดิบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1

- ชั่งสตาร์ชออกทีนินชั้กซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม
- ชั่งซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม
- ชั่งน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

เตรียมสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณ 700 กรัม

สารละลาย 100 กรัม มีสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต 2.5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

สารละลาย 700 กรัม มีสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต $\frac{2.5 \times 700}{100} = 17.5$ กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

เนื่องจาก สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต มีความชื้น 12.07% โดยน้ำหนักแห้ง เพราะฉะนั้นสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต 100 กรัม มีน้ำอยู่ 12.07 กรัม มีสตาร์ชอยู่ 87.93 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

ถ้าต้องการสตาร์ช 87.93 กรัม ต้องชั่งสตาร์ชมา 100 กรัม

ถ้าต้องการสตาร์ช 17.5 กรัม ต้องชั่งสตาร์ชมา $\frac{17.5 \times 100}{87.93} = 19.90$ กรัม

ซอร์บิทอลใช้ความเข้มข้น 40% total solid นั่นคือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม มาจากสตาร์ช 60 กรัม และซอร์บิทอล 40 กรัม

ถ้าสตาร์ช 60 กรัม ใช้ซอร์บิทอล 40 กรัม

ถ้าสตาร์ช 17.5 กรัม ใช้ซอร์บิทอล $\frac{17.5 \times 40}{60} = 11.67$ กรัม

เนื่องจากซอร์บิทอลมีปริมาณของแข็งที่วัดได้ 70 °Brix เพราะฉะนั้น

ถ้าต้องการซอร์บิทอล 70 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ต้องชั่งซอร์บิทอล 100 กรัม โดยน้ำหนักเปียก

ถ้าต้องการซอร์บิทอล 11.67 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ต้องชั่งซอร์บิทอล $\frac{11.67 \times 100}{70} = 16.67$ กรัม โดยน้ำหนักเปียก

เตรียมสารละลายทั้งหมด 700 กรัม ดังนั้นต้องผสมน้ำ = $700 - (19.90 + 16.67) = 663.43$ กรัม

ส่วนที่ 2

- ชั่งกรดโอเลอิก ปริมาณ 1.75 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

เตรียมกรดโอเลอิกอัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.1

สตาร์ช 1 กรัม ใช้กรดโอเลอิก 0.1 กรัม

สตาร์ช 17.5 กรัม ใช้กรดโอเลอิก $17.5 \times 0.1 = 1.75$ กรัม

2.1.2 สูตรผสมกรดโอเลอิก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิกพิด เท่ากับ 1:0.2 แบ่งเตรียมวัตถุดิบ ออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1

- ชั่งสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม
- ชั่งซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม
- ชั่งน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

เตรียมสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณ 700 กรัม

สารละลาย 100 กรัม มีสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต 2.5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

สารละลาย 700 กรัม มีสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต $\frac{2.5 \times 700}{100} = 17.5$ กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

เนื่องจาก สตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต มีความชื้น 12.07 โดยน้ำหนักแห้ง เพราะฉะนั้นสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนต 100 กรัม มีน้ำอยู่ 12.07 กรัม มีสตาร์ชอยู่ 87.93 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง

ถ้าต้องการสตาร์ช 87.93 กรัม ต้องชั่งสตาร์ชมา 100 กรัม

ถ้าต้องการสตาร์ช 17.5 กรัม ต้องชั่งสตาร์ชมา $\frac{17.5 \times 100}{87.93} = 19.90$ กรัม

ซอร์บิทอลใช้ความเข้มข้น 40% total solid นั่นคือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม มาจากสตาร์ช 60 กรัม และซอร์บิทอล 40 กรัม

ถ้าสตาร์ช 60 กรัม ใช้ซอร์บิทอล 40 กรัม

ถ้าสตาร์ช 17.5 กรัม ใช้ซอร์บิทอล $\frac{17.5 \times 40}{60} = 11.67$ กรัม

เนื่องจากซอร์บิทอลมีปริมาณของแข็งที่วัดได้ 70 °Brix เพราะฉะนั้น

ถ้าต้องการซอร์บิทอล 70 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ต้องชั่งซอร์บิทอล 100 กรัมโดยน้ำหนักเปียก

ถ้าต้องการซอร์บิทอล 11.67 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ต้องชั่งซอร์บิทอล $\frac{11.67 \times 100}{70} = 16.67$ กรัมโดยน้ำหนักเปียก

เตรียมสารละลายทั้งหมด 700 กรัม ดังนั้นต้องผสมน้ำ = $700 - (19.90 + 16.67) = 663.43$ กรัม

ส่วนที่ 2

- ชั่งกรดโอเลอิก ปริมาณ 3.50 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

เตรียมกรดโอเลอิกอัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.2

สตาร์ช 1 กรัม ใช้กรดโอเลอิก 0.2 กรัม

สตาร์ช 17.5 กรัม ใช้กรดโอเลอิก $17.5 \times 0.2 = 3.50$ กรัม

2.1.3 สูตรผสมกรดสเตียริก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.1

ส่วนที่ 1

- ชั่งสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม

- ชั่งซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม

- ชั่งน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.1

ส่วนที่ 2

- ชั่งกรดสเตียริก ปริมาณ 1.75 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.1

2.1.4 สูตรผสมกรดสเตียริก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.2

ส่วนที่ 1

- ชั่งสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม

- ชั่งซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม

- ชั่งน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.2

ส่วนที่ 2

- ชั่งกรดสเตียริก ปริมาณ 3.50 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.2

2.1.5 สูตรผสมกรดปาล์มมิติก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.1

ส่วนที่ 1

- ชั่งสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม

- ซังซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม

- ซังน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.1

ส่วนที่ 2

- ซังกรดปาล์มมิติก ปริมาณ 1.75 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.1

2.1.6 สูตรผสมกรดปาล์มมิติก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.2

ส่วนที่ 1

- ซังสตาร์ชออกทีนิลซัคซิเนตปริมาณ 19.90 กรัม

- ซังซอร์บิทอล ปริมาณ 16.67 กรัม

- ซังน้ำกลั่น ปริมาณ 663.43 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.2

ส่วนที่ 2

- ซังกรดโอเลอิก ปริมาณ 3.50 กรัม

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.2

2.2 วิธีการเตรียม

1. เตรียมสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปออกทีนิล (สตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรูปออกทีนิล, Non-Crystallizing sorbitol 40 %(total solid) และน้ำกลั่น) โดยที่สารละลายทั้งหมดมีน้ำหนัก 700 กรัม

2. ผสมให้เข้ากันด้วย magnetic bar ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และให้ความร้อนด้วย hot plate ปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. ผสมลิพิดด้วย Blender เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงนำไปผ่านเครื่อง High pressure Homogenizer ที่ระดับความดัน 300/30 bar

4. กำจัดฟองอากาศภายในสารละลายด้วยเครื่องกำจัดฟองก๊าซ (sonicator, ยี่ห้อ CREST TRU-SWEEPTM, รุ่น 275DAE) ระดับ 8 เป็นเวลา 20 นาที ได้เป็นสารเคลือบอิมัลชัน

5. เทสารละลายฟิล์มบริโกลด์ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 0.50 กรัม / เฟลทใน plastic plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ในระหว่างเทสารละลายควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ในช่วง 75 ± 5 องศาเซลเซียส

6. ทำให้แห้งที่สภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ± 5 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

7. นำตัวอย่างฟิล์มที่แห้งแล้วไปเก็บรักษา ณ ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 53 ± 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกันนี้ 3 ซ้ำการทดลอง

3. การเตรียมสารเคลือบและการเคลือบขนมข้าวอบกรอบด้วยสารเคลือบ

3.1 วิธีการคำนวณ

3.1.1 สารเคลือบสูตรไม่ผสมลิพิด

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 1.1

3.1.2 สารเคลือบสูตรกรดปาล์มมิก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.2

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.6

3.1.3 สารเคลือบสูตรกรดสเตียริก อัตราส่วนสตาร์ชต่อลิพิด เท่ากับ 1:0.2

การคำนวณเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างข้อ 2.1.4

3.2 วิธีการเตรียมสารเคลือบ

1. เตรียมสารละลายสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอกทีนิล (สตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรรอกทีนิล, Non-Crystallizing sorbitol 40 % (total solid) และน้ำกลั่น) โดยที่สารละลายทั้งหมดมีน้ำหนัก 700 กรัม

2. ผสมให้เข้ากันด้วย magnetic bar ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และให้ความร้อนด้วย hot plate ปรับอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. ผสมลิพิดด้วย Blender เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงนำไปผ่านเครื่อง High pressure Homogenizer ที่ระดับความดัน 300/30 bar

4. กำจัดฟองอากาศภายในสารละลายด้วยเครื่องกำจัดฟองก๊าซ (sonicator, ยี่ห้อ CREST TRU-SWEEPTM, รุ่น 275DAE) ระดับ 8 เป็นเวลา 20 นาที ได้เป็นสารเคลือบอิมัลชัน เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกันนี้ 2 ซ้ำการทดลอง

3.3 วิธีการเคลือบขนมข้าวอบกรอบ

1. อุ้มนมข้าวอบกรอบให้มีอุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 10 นาที
2. คลุกสารเคลือบที่เตรียมจากข้อ 3.2 และนมให้เข้ากัน โดยใช้อัตราส่วนของนมข้าวอบกรอบ : สารเคลือบ เท่ากับ 150:75 กรัม ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องเคลือบนม ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลานาน 5 นาที
3. ตักนมใส่ตะแกรงลวดและใช้ไม้พายเกลี่ยนมให้แผ่ทั่วตะแกรง
4. จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. หลังจากนำนมออกจากตู้อบ ให้วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก่อนบรรจุถุงอะลูมิเนียมปิดสนิท เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกันนี้ 2 ซ้ำการทดลอง



ภาพที่ 19 เครื่องเคลือบนม

ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

1. การศึกษาลักษณะพื้นผิวและภาพตัดขวางของฟิล์ม
 1. เตรียมตัวอย่างขนาด 1×1 เซนติเมตร ที่ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 0 และอุณหภูมิห้อง โดยใส่ในโหลที่มีซิลิกาเจล เป็นเวลา 3 วัน
 2. ศึกษาลักษณะพื้นผิวและลักษณะภาพตัดขวางของฟิล์มด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (รุ่น JSA-541QLV) 10 kV ความหนาของชั้นเคลือบทองคำคือ 10-20 nm
2. การศึกษาด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
 1. เตรียมตัวอย่างฟิล์มเป็นชิ้นเล็กๆ ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 0 และอุณหภูมิห้อง โดยใส่ในโหลที่มีซิลิกาเจล เป็นเวลา 3 วัน
 2. บดตัวอย่างที่เตรียมไว้ 2 มิลลิกรัมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว 100 มิลลิกรัม ทำการอัดด้วยเครื่อง hydrolic press จนได้แผ่นกลมใสคล้ายแก้ว (KBr Disc)
 3. นำแผ่น KBr Disc ใส่ที่ยึดแล้ววางบนลำรังสี IR สแกนตั้งแต่ช่วงเลขคลื่น 4000-450 cm^{-1}
3. สมบัติเชิงกล
 1. เตรียมตัวอย่าง 1.5 × 6 เซนติเมตร เก็บใน Chamber ที่ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 53±5 ด้วยสารละลายแมกนีเซียมไนเตรดอิ่มตัว และอุณหภูมิ 25±5 องศาเซลเซียส
 2. วัดค่า Tensile strength และค่า %Elongation at break โดยเลือกหัววัดระบบ tension grip แบบ A/TG อัตราการเคลื่อนที่จะคงตัวที่ 1 mm/s ด้วยเครื่อง Texture analyzer (รุ่น TA-XT2i, Stable Micro System Co.,Ltd.,UK)
 3. ทดสอบแรงดึงจำนวน 10 ซ้ำ โดยที่ระยะห่างระหว่าง grips เท่ากับ 3 เซนติเมตร ความเร็วของการเคลื่อนตัวเป็น 1 mm/s
 4. วัดค่าสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มแบ่งเป็น 2 ส่วน คือค่า maximum load ค่าระยะทางสุดท้ายที่ฟิล์มเริ่มขาด เพื่อคำนวณค่า Tensile strength ,ค่า %Elongation at break และค่า Elastic modulus จากสูตร (1) , (2) และ (3) (Romero-bastida และคณะ , 2005)

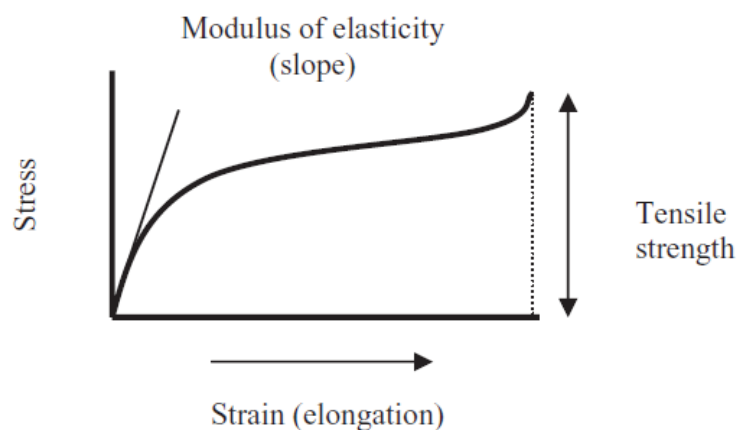
$$\text{Tensile strength} = \frac{\text{Maximum load}}{\text{Area}} \quad (1)$$

$$\% \text{ Elongation at break} = \frac{L - L'}{L} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ L คือ ระยะทางเริ่มต้น
L' คือ ระยะทางที่ฟิล์มขาดออกจากกัน

$$\text{Elastic Modulus} = \frac{F \times L}{A \times \Delta L} \quad (3)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ให้ (นิวตัน)
L คือ ระยะทางเริ่มต้น
A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของฟิล์มที่แรงกระทำ
 ΔL คือ ความยาวของแผ่นฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 20 ตัวอย่าง stress-strain curve

ที่มา: Maftoonazad และคณะ (2007)

4. ลักษณะผลึกภายในฟิล์ม

1. เตรียมตัวอย่างฟิล์มบริโกลได้ ขนาด 2×2 เซนติเมตร เก็บใน Chamber ที่ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 53 ± 5 ด้วยสารละลายแมกนีเซียมไนเตรดอิ่มตัว และอุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส

2. ศึกษาผลึกภายในฟิล์ม โดยใช้ X-ray diffraction ตามวิธีของ Jiménez และคณะ (2012) โดยการยิงรังสีเอกซ์ 50 กิโลวัตต์ 300 มิลลิแอมแปร์ ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.5418 Å ช่วงการสแกนคือตั้งแต่ 2 θ เท่ากับ 5 ถึง 50 องศา และสแกนด้วยอัตรา 1.5 องศาต่อนาที

5. ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ

เตรียมฟิล์มตัวอย่างที่ไม่มีกำหนดค่าให้ได้ขนาดตามภาชนะที่ใช้ทดสอบ วางปิดบนภาชนะทดสอบที่ใช้ซิลิกาเจล นำภาชนะที่ปิดด้วยฟิล์มตัวอย่างใส่ในตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 75 \pm 2 และอุณหภูมิ 25 \pm 2 °C ที่ความเร็วลม 3.26 m/s ชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุก 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง สร้างกราฟระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงและเวลา นำค่าความชันมาคำนวณค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำจากสูตร (4) และ (5) วิเคราะห์เช่นเดียวกันนี้ 3 ซ้ำการทดลอง

$$WVTR = m / A \quad (4)$$

เมื่อ m คือ ความชันของกราฟระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงและเวลา
 A คือ พื้นที่ผิวของฟิล์มตัวอย่างที่ไอน้ำเคลื่อนย้าย

$$WVP = (WVTR * L) / \Delta P \quad (5)$$

เมื่อ L คือ ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มตัวอย่าง
 ΔP คือ ความแตกต่างของความดันที่ภายในตู้ควบคุมสภาวะและภายในด้วยทดสอบ

6. การวัดความขุ่น

1. เตรียมตัวอย่างฟิล์มบริโกลได้ ขนาด 2 \times 2 เซนติเมตร เก็บใน Chamber ที่ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 53 \pm 5 ด้วยสารละลายแมกนีเซียมไนเตรดอิ่มตัว และอุณหภูมิ 25 \pm 5 องศาเซลเซียส

2. วัดความขุ่นด้วยเครื่อง HunterLab model Miniscan XE โดยใช้แบบ Day light (D65)

3. นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างวางบนแผ่นกระเบื้องสีขาว สลับกับกระเบื้องสีดำ เพื่อให้เครื่อง HunterLab model Miniscan XE คำนวณค่าความขุ่นของตัวอย่าง วัดค่าความขุ่นเช่นเดียวกันนี้ 3 ซ้ำการทดลอง

7. การศึกษาชอร์ปชันไอโซเทอมของตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบ

ส่งตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบวิเคราะห์แอดชอร์ปชันไอโซเทอมที่บริษัท จาร์พา เทคโนโลยี (CHARPA TECHCENTER) จำกัด โดยใช้ระบบ Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) ด้วยเครื่อง Vapor Sorption Analyzer

8. ปริมาตรจำเพาะตามวิธีของ Lacaze และคณะ (2007)

นำขนม 75 กรัม ชั่งน้ำหนักให้ได้ค่าที่แน่นอน เทเมล็ดงาที่มีขนาดที่สม่ำเสมอลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่นอน เรียงชั้นขนมลงในภาชนะและเทเมล็ดงาสลับกันไป สุดท้ายเทเมล็ดงาให้เต็มและปิดฝิดหน้าให้เรียบ

$$\text{ปริมาตรจำเพาะ} = \frac{\text{ปริมาตรเมล็ดงาเต็มภาชนะ} - \text{ปริมาตรเมล็ดงาที่ผสมลงในภาชนะ}}{\text{น้ำหนักขนม 75 กรัม}}$$

หาปริมาตรจำเพาะเช่นเดียวกันนี้ 2 ซ้ำการทดลอง

9. ร้อยละการเกาะติดตามวิธีของ Hamada และคณะ (2005)

ชั่งน้ำหนักขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบสารเคลือบและหลังผ่านการอบแห้ง จากนั้นนำมาคำนวณตามสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง} - \text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนผสมสารเคลือบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนผสมสารเคลือบ}} \times 100$$

หาค่าร้อยละการเกาะติดเช่นเดียวกันนี้ 2 ซ้ำการทดลอง

10. การทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบโดยเครื่อง Texture analyzer

1. นำตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบวางลงบนฐานรองรับตัวอย่างของเครื่องทดสอบ
2. กำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ Pretest speed 1 มิลลิเมตร/วินาที, test speed 1 มิลลิเมตร/วินาที, Posttest speed 10 มิลลิเมตร/วินาที และระยะระหว่าง probe กับฐาน 30 มิลลิเมตร
3. กด run a test เครื่องจะทำการทดสอบตัวอย่าง โดยใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้ จำนวนชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้นต่อการวัด 1 ครั้ง ทำการวัด 10 ครั้งในหนึ่งซ้ำการทดลอง โดยใช้หัววัด cylindrical Probe ที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ลักษณะที่ทำการวัด คือ วัดค่าแรงกดสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่าง

แตกในครั้งแรก และค่าแรงกดสูงสุดที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ 3 ซ้ำการทดลอง

11. การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบก่อนและหลังเคลือบสารเคลือบ

11.1 การฝึกฝนผู้ชิม

1. จากกลุ่มนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร กลุ่มหนึ่งเลือกผู้ชิมจำนวน 15 คน และให้แน่ใจว่าคนเหล่านี้เต็มใจที่จะร่วมทดสอบและสามารถจะเข้าร่วมในการทดสอบได้ตลอดระยะเวลาของการทดสอบ

2. เรียกประชุมกลุ่มผู้ชิมเพื่อแถลงจุดประสงค์ และให้ผู้ชิมทดสอบผลิตภัณฑ์ขนมข้าวอบกรอบอะราเร่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั้งแบบมีสารเคลือบและไม่มีสารเคลือบ จากนั้นร่วมกันคิดกำหนดคำศัพท์ที่บรรยายเกี่ยวกับลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมข้าวอบกรอบอะราเร่ ซึ่งคำศัพท์ที่กำหนดได้ คือ ความเปราะ ความแข็ง และความเหนียวติดช่องปากและฟัน จากนั้นจึงชี้แจงนิยามหรือคำจำกัดความของคำศัพท์แต่ละคำให้ผู้ชิมมีความเข้าใจที่ตรงกัน คือ ความเปราะ หมายถึง แรงที่ใช้ในการกัดตัวอย่างและทำให้ตัวอย่างแตกหักในครั้งแรก ความแข็ง หมายถึง แรงสูงสุดที่ใช้ในการกัดตัวอย่าง และความเหนียวติดช่องปากและฟัน หมายถึง การติดช่องปากและฟันของเศษขนมหลังจากการเคี้ยว

3. ฝึกฝนผู้ชิม ตามคำศัพท์ที่กำหนดลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมข้าวอบกรอบอะราเร่ในข้างต้น โดยใช้ตัวอย่างอ้างอิงดังแสดงในตารางที่ 8 ทำการฝึกฝนผู้ชิมจำนวน 2 ครั้ง จนมั่นใจว่าผู้ชิมสามารถจดจำระดับของแต่ละลักษณะที่กำหนดได้

ตารางที่ 8 ระดับและตัวอย่างอ้างอิงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส

Attribute	scale	reference sample
Brittleness	1.0	Muffin, 1/2 in cube, BigC bakery
	4.0	Crackers, 1 pieces, Nabisco
	10.0	Wafer, 1/2 in square, Bissin coffee wafer, Thai president Ltd.
	14.5	Hard candy, 1 piece, Clorets hard candy, Cranbury Adams (Thailand) Ltd.
hardness	2.5	Egg white, 1/2 in cube
	7.0	Frankfurter, Large, 1/2 in cube, cooked 5 min, CP Co.
	9.5	Peanuts, 1 nut, Tong garden Co.
	14.5	Hard candy, 1 piece, Clorets hard candy, Cranbury Adams (Thailand) Ltd.
Sticky mouth coating	1.0	Carrot, uncooked, fresh, unpeeled 1/2 in cube
	7.0	Crackers, 1 pieces, Rosy crackers, Imperial general food
	15.0	Mangosteen candy, 1 piece, Mae Lee, Chantabyri

ที่มา: คัดแปลงจาก Chaiyakul และคณะ (2008)

11.2 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ

1. เตรียมตัวอย่างขนมข้าวอบกรอบอะระเร่ก่อนเคลือบ และหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไม่ผสมลิพิด, สารเคลือบสตาร์ช:กรดสแตียริก 1:0.2 และสารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2 ตัวอย่างละ 5 ชิ้น ในถุงซิปล็อคขนาด 6×8 เซนติเมตร พร้อมทั้งให้รหัสกำกับตัวอย่างเป็นตัวเลขอย่างสุ่ม 3 ตำแหน่ง

2. แบบประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ใช้ในการทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ แสดงในภาคผนวก ฉ ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดชี้แจงการทดสอบ และลักษณะทางประสาทสัมผัส โดยในแต่ละลักษณะทางประสาทสัมผัสประกอบด้วยเส้นคะแนนยาว 15 เซนติเมตร และมีขีดระดับ “น้อย” (recognition threshold) ที่ระยะ 1.25 เซนติเมตร และ “มาก” (saturation threshold) ที่ระยะ 13.75 เซนติเมตร

3. เสรีฟตัวอย่างที่เตรียมไว้ในข้างต้น พร้อมกับแบบทดสอบและน้ำดื่มเพื่อใช้ในการล้างปากระหว่างตัวอย่างให้กับผู้ชมที่ผ่านการฝึกฝนแล้ว ทำการทดสอบในผู้ชมส่วนตัวที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Tensile strength ของตัวอย่างฟิล์ม

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	3.20642857	3.20642857	46.51	<.0001*
type	2	0.88410000	0.44205000	6.41	0.0106*
level	1	0.46080000	0.46080000	6.68	0.0216*
type*level	2	0.12023333	0.06011667	0.87	0.4397
Error	14	0.96526667	0.06894762		
Corrected Total	20	5.63682857			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 10 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า Elastic modulus ของตัวอย่างฟิล์ม

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	421.8516071	421.8516071	10.30	0.0063*
type	2	238.9521333	119.4760667	2.92	0.0873
level	1	68.7964500	68.7964500	1.68	0.2159
type*level	2	52.9825333	26.4912667	0.65	0.5387
Error	14	573.444000	40.960286		
Corrected Total	20	1356.026724			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 11 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า %Elongation ของตัวอย่างฟิล์ม

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	1016.436007	1016.436007	6.65	0.0218*
type	2	523.592033	261.796017	1.71	0.2159
level	1	4.390672	4.390672	0.03	0.8678
type*level	2	1023.854678	511.927339	3.35	0.0647
Error	14	2138.468133	152.747724		
Corrected Total	20	4706.741524			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 12 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาของตัวอย่างฟิล์ม

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	1.0957341	1.0957341	0.11	0.7438
type	2	490.0400778	245.0200389	24.85	<.0001*
level	1	0.2026722	0.2026722	0.02	0.8880
type*level	2	21.6678778	10.8339389	1.10	0.3604
Error	14	138.0330667	9.8595048		
Corrected Total	20	651.0394286			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 13 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำของตัวอย่างฟิล์ม

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	0.06133651	0.06133651	4.70	0.0479*
type	2	0.03014444	0.01507222	1.15	0.3434
level	1	0.05555556	0.05555556	4.26	0.0582
type*level	2	0.03201111	0.01600556	1.23	0.3231
Error	14	0.18273333	0.01305238		
Corrected Total	20	0.36178095			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 14 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของตัวอย่างฟิล์ม

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	0.20240079	0.20240079	4.26	0.0582
type	2	0.76907778	0.38453889	8.09	0.0046*
level	1	0.16245000	0.16245000	3.42	0.0858
type*level	2	0.04423333	0.02211667	0.47	0.6374
Error	14	0.66573333	0.04755238		
Corrected Total	20	1.84389524			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 15 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาตรจำเพาะของขนมข้าวอบกรอบสูตรต่างๆ

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	2	0.30106724	0.15053362	4.76	0.1174
Error	3	0.09496564	0.03165521		
Corrected Total	5	0.39603288			

ตารางที่ 16 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเกาะติดของสารเคลือบบนผลิตภัณฑ์

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.36911719	0.12303906	5.77	0.0618
Error	4	0.08530076	0.02132519		
Corrected Total	7	0.45441795			

ตารางที่ 17 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงที่ใช้ในการทำให้อย่างแตกในครั้งแรกด้วยเครื่อง Texture analyzer

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	525.8375614	525.8375614	765.55	<.0001*
lipid vs nolipid	1	5.9985769	5.9985769	8.73	0.0418*
PA vs SA	1	15.9070354	15.9070354	23.16	0.0086*

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 18 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงกดสูงสุด ด้วยเครื่อง Texture analyzer

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
control VS other	1	473.0482592	473.0482592	485.17	<.0001*
lipid vs nolipid	1	2.0299300	2.0299300	2.08	0.2225
PA vs SA	1	0.6779052	0.6779052	0.70	0.4513

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 19 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ
ด้านความเปรี้ยว

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
blk	9	34.83006250	3.87000694	6.48	<.0001*
trt	3	9.71918750	3.23972917	5.43	0.0047*
control vs others	1	9.15768750	9.15768750	15.34	0.0006*
type	2	0.56150000	0.28075000	0.47	0.6299
Error	27	16.12018750	0.59704398		
Corrected Total	39	60.66943750			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 20 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ
ด้านความแข็ง

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
blk	9	60.16750000	6.68527778	21.48	<.0001*
trt	3	16.30125000	5.43375000	17.46	<.0001*
control vs others	1	10.86008333	10.86008333	34.89	<.0001*
type	2	5.44116667	2.72058333	8.74	0.0012*
Error	27	8.40500000	0.31129630		
Corrected Total	39	84.87375000			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 21 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมข้าวอบกรอบ
ด้านความเหนียวติดช่องปากและฟัน

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
blk	9	16.95775000	1.88419444	2.97	0.0136*
trt	3	7.14425000	2.38141667	3.76	0.0525
control vs others	1	0.09075000	0.09075000	0.14	0.7082
type	2	7.05350000	3.52675000	5.56	0.0952
Error	27	17.12075000	0.63410185		
Corrected Total	39	41.22275000			

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p < 0.05$)

ตารางที่ 22 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างแตก
ในครั้งแรกที่ได้จากเครื่อง Texture analyzer กับค่าความเปราะที่ได้จากการทดสอบ
ทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี General Quantitative Descriptive Analysis โดยผู้บริโภครที่
ได้รับการฝึกฝนจำนวน 10 คนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

		crisptext	crispsens
crisptext	Pearson Correlation	1	-0.952*
	Sig.(2-tailed)		0.048
	N	4	4
crispsens	Pearson Correlation	-0.952*	1
	Sig.(2-tailed)	0.048	
	N	4	4

*มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ภาคผนวก ง ตารางผลการทดลอง

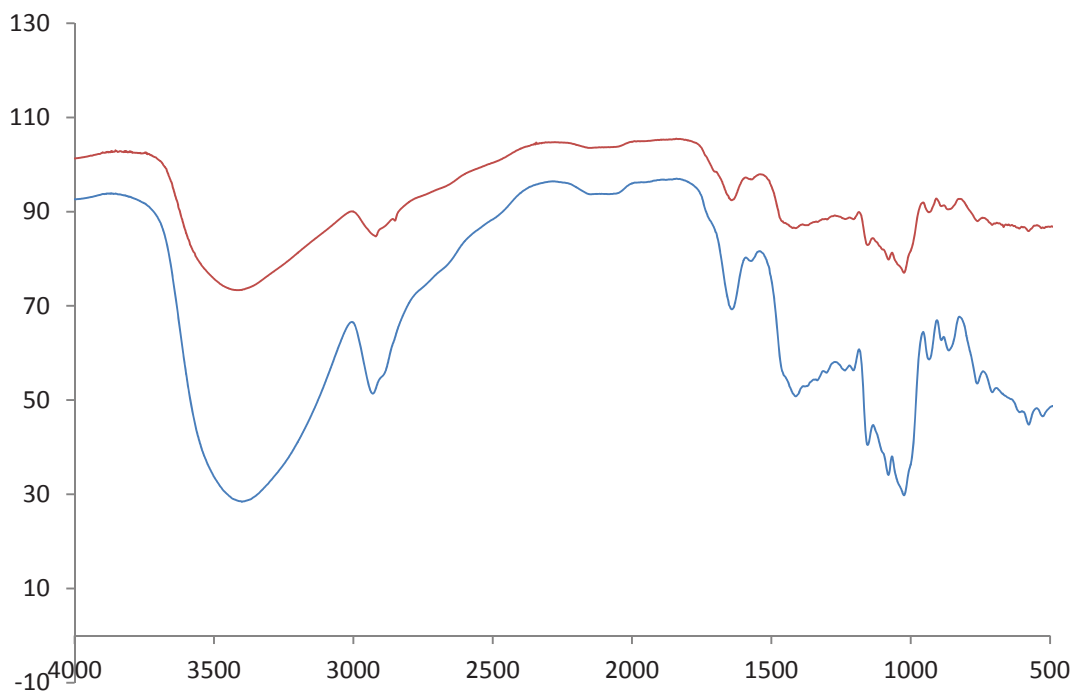
ตารางที่ 23 อัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำ ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ และความหนาของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมจากสตาร์ชและกรดไขมันในอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ทดสอบ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 ± 5

ตัวอย่าง	WVTR ($\times 10^{-3}$ g/hr cm ²)	WVP ($\times 10^{-7}$ g hr ⁻¹ m ⁻¹ Pa ⁻¹)	Thickness (μ m)
ควบคุม	1.40 \pm 0.14 ^a	2.45 \pm 0.06 ^a	59.54 \pm 4.39 ^b
กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.1:1	1.28 \pm 0.16 ^{ab}	2.48 \pm 0.27 ^a	66.17 \pm 1.74 ^a
กรดโอเลอิก:สตาร์ช=0.2:1	1.26 \pm 0.03 ^{ab}	2.43 \pm 0.17 ^a	65.48 \pm 3.92 ^a
กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.1:1	1.39 \pm 0.12 ^a	2.15 \pm 0.37 ^{ab}	51.90 \pm 4.30 ^c
กรดสเตียริก:สตาร์ช=0.2:1	1.17 \pm 0.12 ^b	1.88 \pm 0.20 ^b	54.58 \pm 2.99 ^{bc}
กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.1:1	1.23 \pm 0.12 ^{ab}	2.15 \pm 0.23 ^{ab}	58.90 \pm 0.60 ^b
กรดปาล์มมิติก:สตาร์ช=0.2:1	1.14 \pm 0.04 ^b	1.90 \pm 0.03 ^b	56.28 \pm 1.89 ^{bc}

ตารางที่ 24 ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง) ของขนมข้าวอบกรอบสูตรต่างๆ

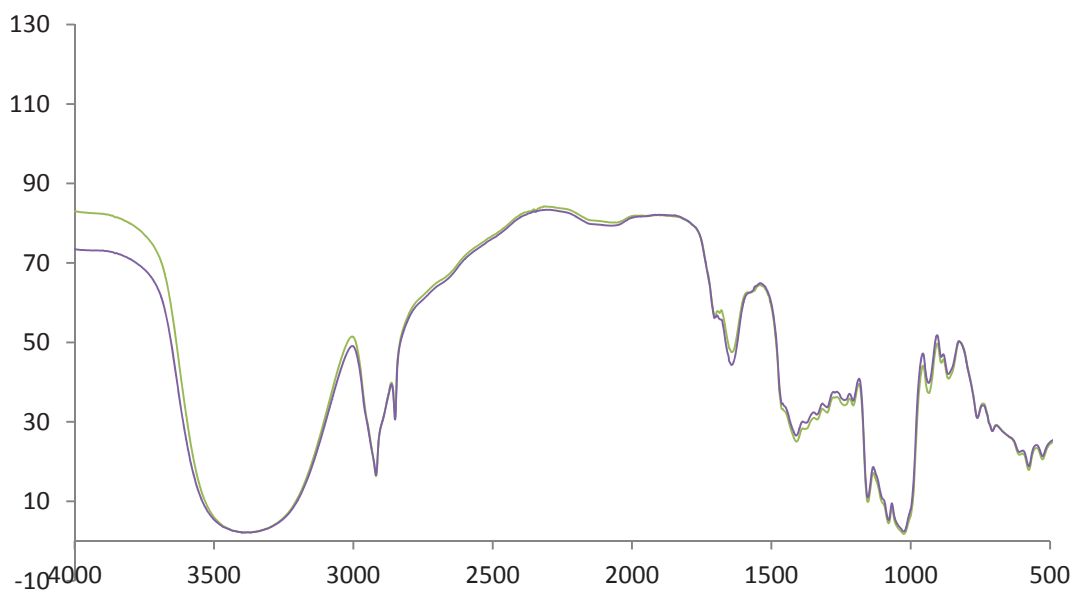
ตัวอย่าง	ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง)
ก่อนเคลือบ	1.65 \pm 0.11
สารเคลือบไม่ผสมลิพิด	5.63 \pm 0.04
สารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2	5.78 \pm 0.05
สารเคลือบสตาร์ช:กรดสเตียริก 1:0.2	5.98 \pm 0.02

ภาคผนวก จ ภาพผลการทดลอง



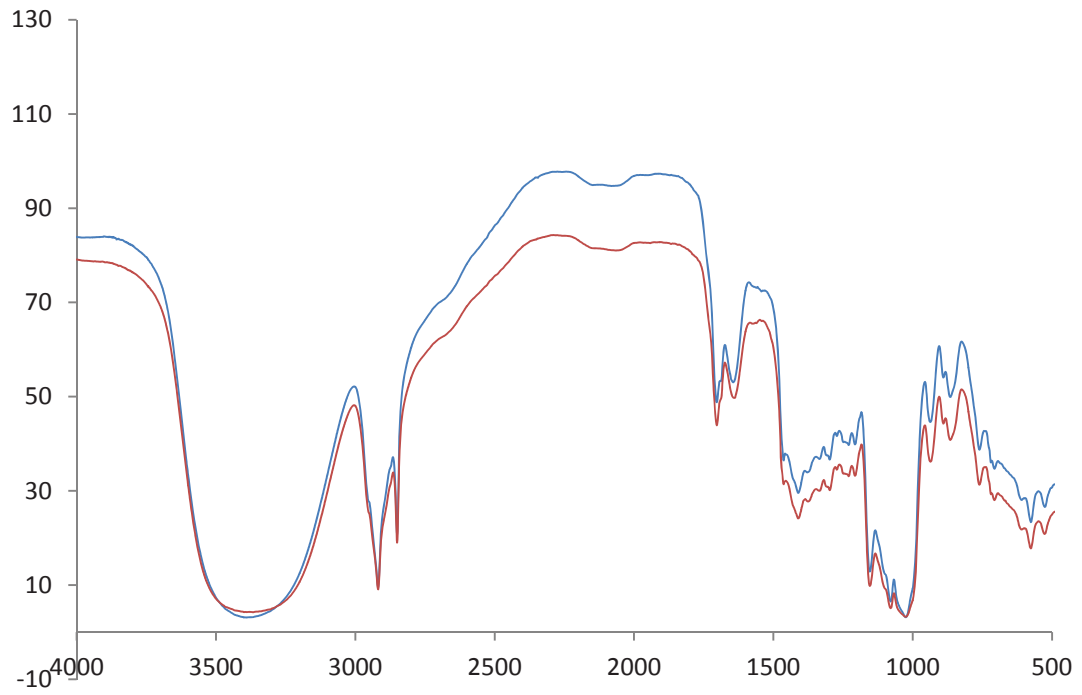
ภาพที่ 21 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรควบคุม(ไม่ผสมลิพิด) ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หมายเหตุ — หมายถึง สูตรควบคุมครั้งที่ 1
 — หมายถึง สูตรควบคุมครั้งที่ 2



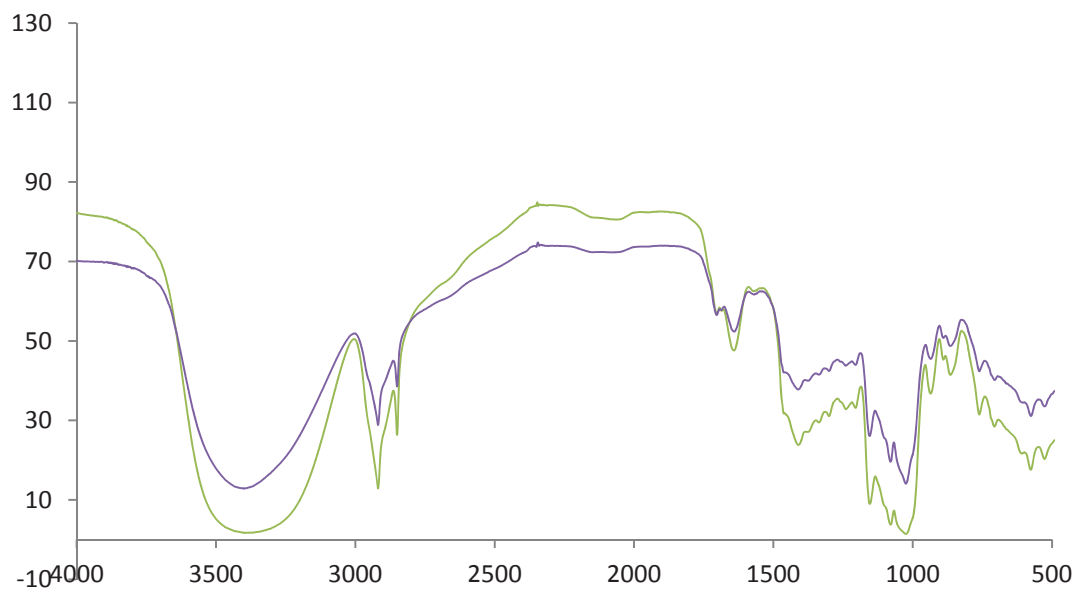
ภาพที่ 22 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดปาล์มมิดิก อัตราส่วนระหว่างกรดปาล์มมิดิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หมายเหตุ — หมายถึง กรดปาล์มมิดิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 1
— หมายถึง กรดปาล์มมิดิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 2



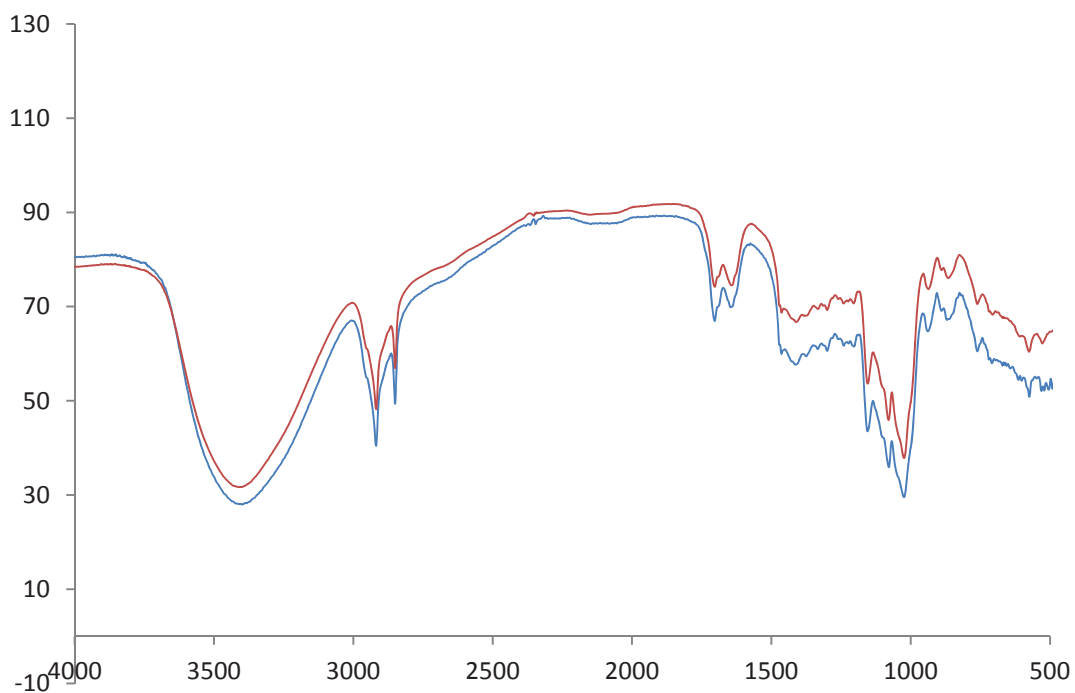
ภาพที่ 23 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดปาล์มมิติค อัตราส่วนระหว่างกรดปาล์มมิติค:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หมายเหตุ — หมายถึง กรดปาล์มมิติค:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1
 — หมายถึง กรดปาล์มมิติค:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 2



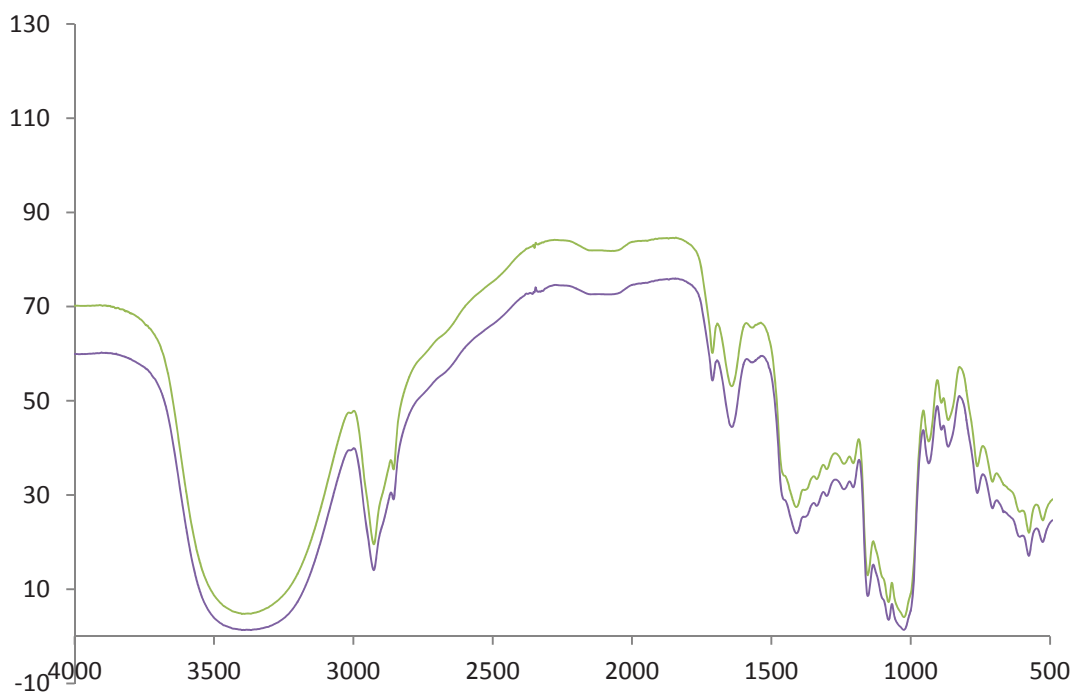
ภาพที่ 24 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดสเตียริก อัตราส่วน
ระหว่างกรดสเตียริก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หมายเหตุ — หมายถึง กรดสเตียริก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 1
— หมายถึง กรดสเตียริก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 2



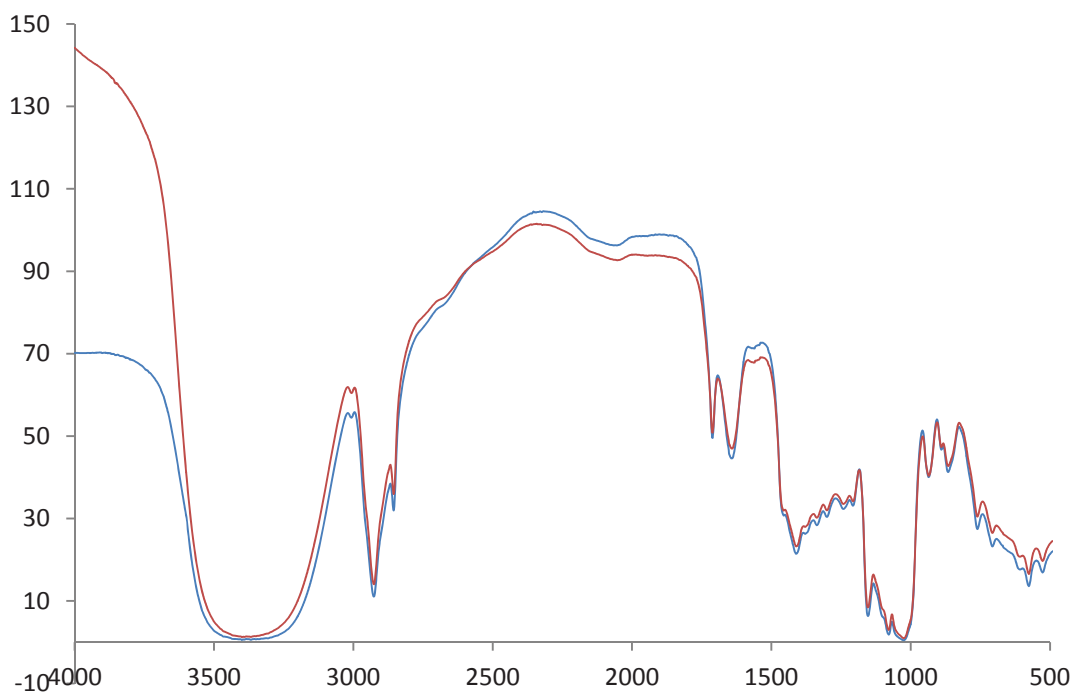
ภาพที่ 25 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดสเตียริก อัตราส่วนระหว่างกรดสเตียริก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หมายเหตุ — หมายถึง กรดสเตียริก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1
 — หมายถึง กรดสเตียริก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 2



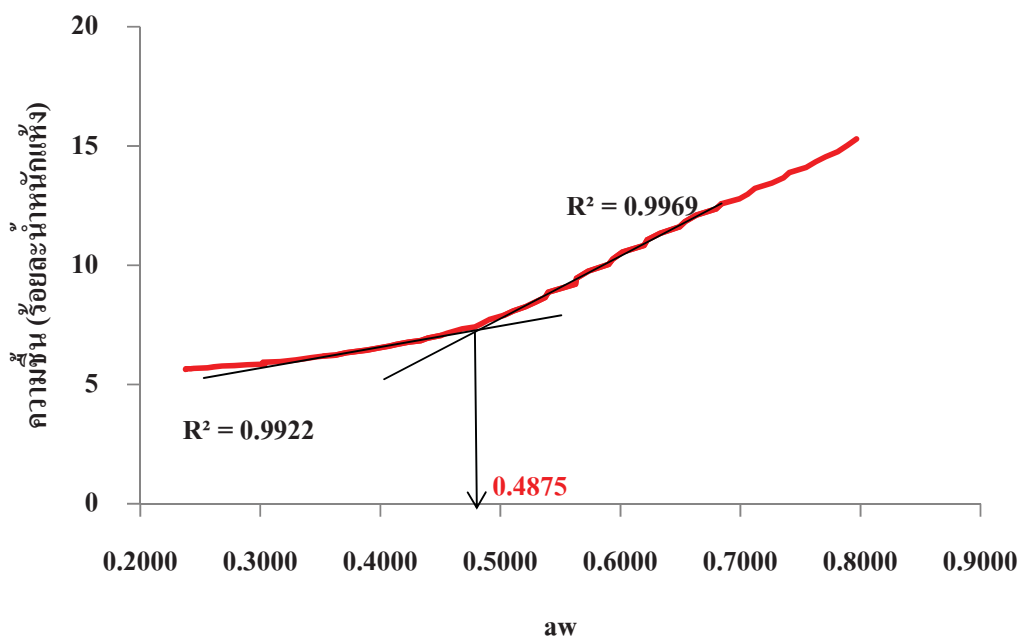
ภาพที่ 26 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดโอเลอิก อัตราส่วนระหว่างกรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

หมายเหตุ — หมายถึง กรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 1
 — หมายถึง กรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.1:1 ครั้งที่ 2

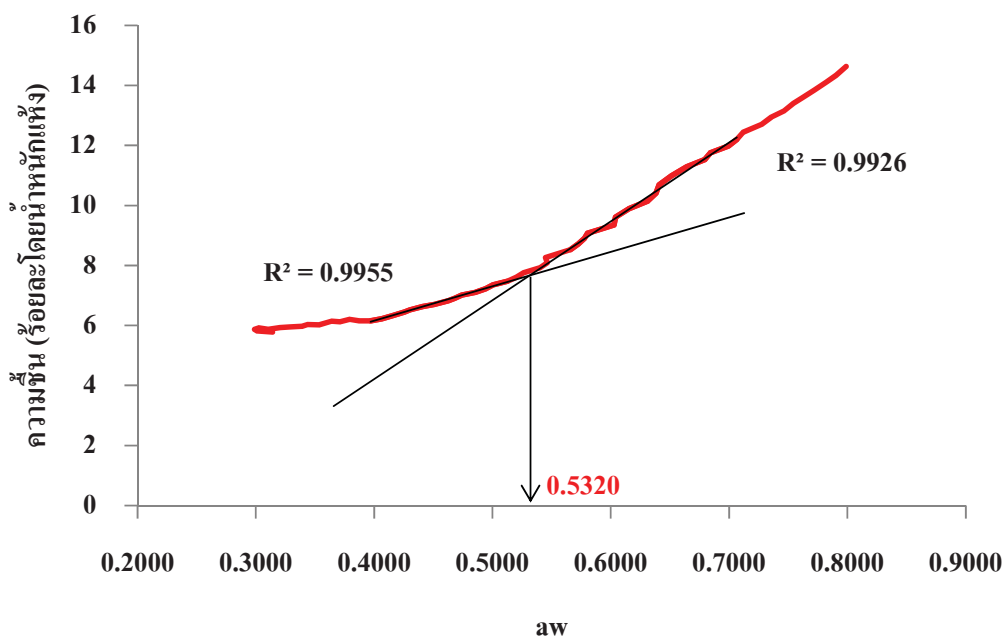


ภาพที่ 27 สเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FTIR เปรียบเทียบฟิล์มสูตรผสมกรดโอเลอิก อัตราส่วนระหว่างกรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

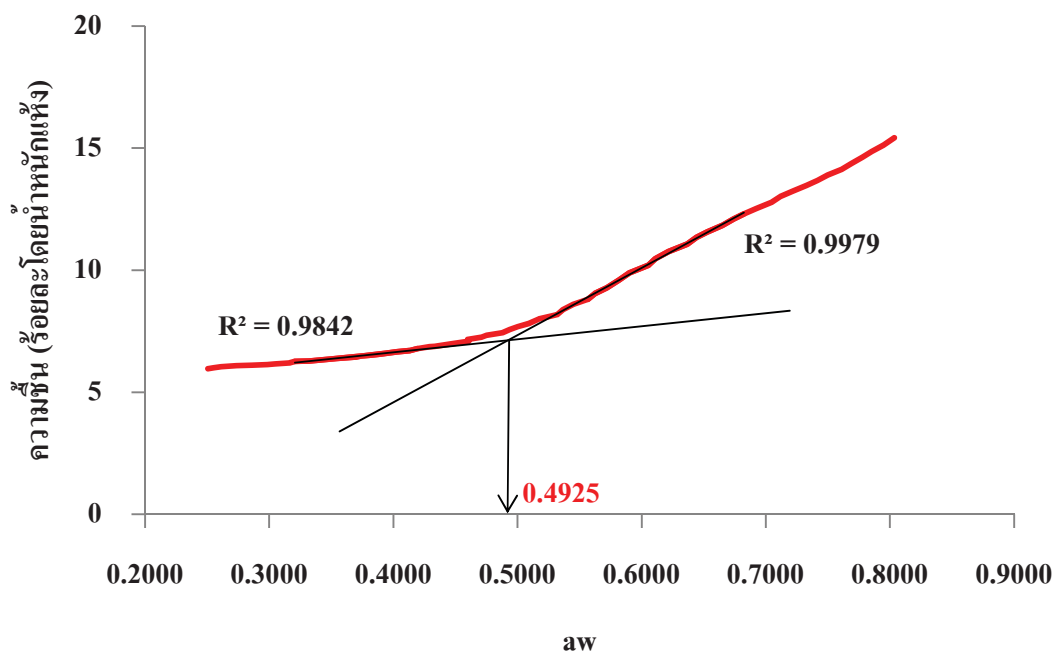
หมายเหตุ — หมายถึง กรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 1
 — หมายถึง กรดโอเลอิก:สตาร์ช เท่ากับ 0.2:1 ครั้งที่ 2



ภาพที่ 28 ค่าความชื้นวิกฤติ (critical water activity) ของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไม่ผสมลิกพิด



ภาพที่ 29 ค่าความชื้นวิกฤติ (critical water activity) ของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบสตาร์ช:กรดปาล์มมิติก 1:0.2



ภาพที่ 30 ค่าความชื้นวิกฤติ (critical water activity) ของขนมข้าวอบกรอบหลังเคลือบด้วยสารเคลือบสตาร์ช:กรดสแตียริก 1:0.2

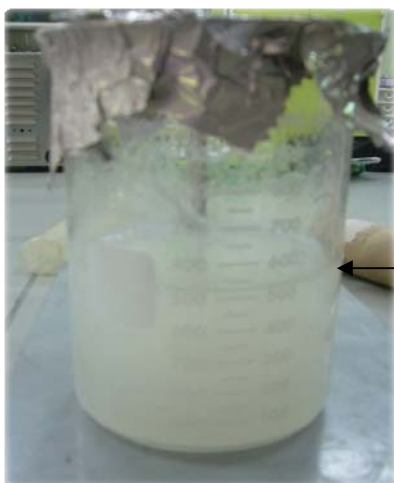


ภาพที่ 31 เปรียบเทียบภาคตัดขวางของขนมข้าวอบกรอบก่อนเคลือบและหลังเคลือบด้วยสารเคลือบไม่ผสมลิพิด (NL), สารเคลือบสารเคลือบสตาร์ช:กรดพาล์มมิก 1:0.2 (PA) และสารเคลือบสตาร์ช:กรดสแตียริก 1:0.2 (SA)

ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์สมบัติสารไขมันต่ำปะหลังตัดแปร และสารไขมันต่ำปะหลังที่ไม่ผ่าน
การตัดแปร

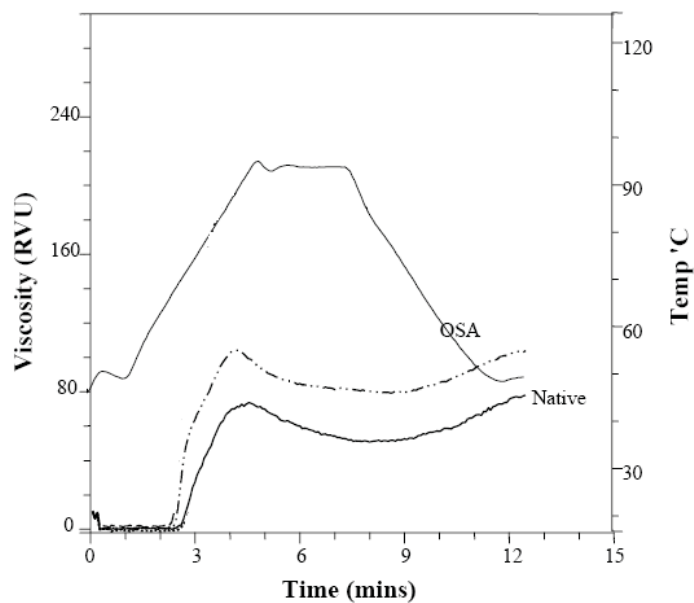
ตารางที่ 25 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลังดิบ และสตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรแบบออกทีนิลซัคซิเนต (หน่วย: ร้อยละ)

รายการ	สตาร์ชมันสำปะหลังดิบ	สตาร์ชมันสำปะหลังตัดแปรแบบออกทีนิลซัคซิเนต
ความชื้น	11.11 ± 0.01	10.60 ± 0.13
โปรตีน	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.00
ไขมัน	0.02 ± 0.01	ตรวจไม่พบ
เถ้า	0.14 ± 0.01	0.50 ± 0.04
อะมิโลส	29.50 ± 1.82	28.42 ± 1.95



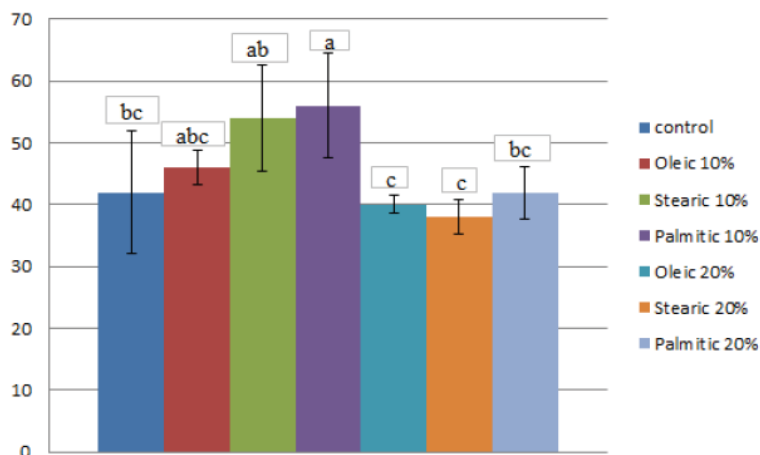
ชั้นของน้ำมันที่ลอยแยกอยู่ด้านบน

ภาพที่ 32 แสดงการแยกชั้นน้ำมันในสตาร์ชมันสำปะหลังดิบหลังผ่านการไฮโดรจีไนซ์เซชัน



ภาพที่ 33 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืดของสตาร์ไขมันสำปะหลังดิบ (native) เปรียบเทียบกับสตาร์ไขมันสำปะหลังตัดแปรรอกทีนิลซัคซินेट (OSA) ทดสอบที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยใช้เครื่อง Rapid Visco-Analyzer

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติอิฐชั้น



ภาพที่ 34 ความหนืด (cP) ของอิมัลชัน ซึ่งเตรียมจากแป้งคัดแปรออกทีนิลซัคซิเนต ที่เติมด้วยกรดไขมันชนิด และระดับต่างๆ โดยวัดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer ด้วยหัววัดเบอร์ 1 ความเร็วรอบ 30 rpm และอุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 26 ค่าขนาดอนุภาคไขมันเฉลี่ย ($d_{3,2}$) ของอิมัลชัน ซึ่งเตรียมจากแป้งคัดแปรออกทีนิลซัคซิเนต ที่เติมด้วยกรดไขมันชนิด และระดับต่างๆ โดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer รุ่น LS100Q, Coulter, USA.

กรดไขมัน	ปริมาณกรดไขมัน (%)	ค่า $d_{3,2}$ (ไมโครเมตร)
Palmitic acid	10	0.724
Palmitic acid	20	0.748
Stearic acid	10	0.796
Stearic acid	20	0.756
Oleic acid	10	1.940
Oleic acid	20	1.257

ภาคผนวก ข แบบประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

General Quantitative Descriptive Analysis Scale

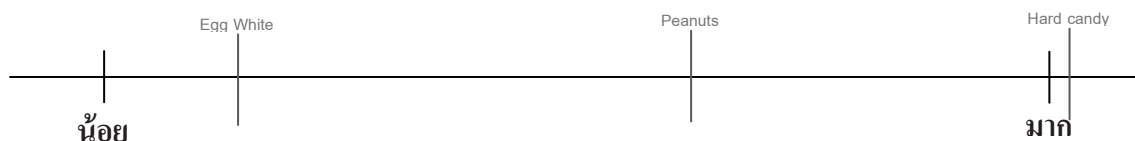
Name : Date :/...../.....

คำชี้แจง กรุณาชิมตัวอย่าง อะราเร่(Arare) ต่อไปนี้ตามลำดับจากซ้ายไปขวา พร้อมทั้งทำเครื่องหมายพร้อมกำกับรหัสตัวอย่างบนเส้นตรงที่กำหนดไว้ในแต่ละลักษณะคุณภาพ โดยใส่เครื่องหมายให้ตรงกับความรู้สึกของท่าน

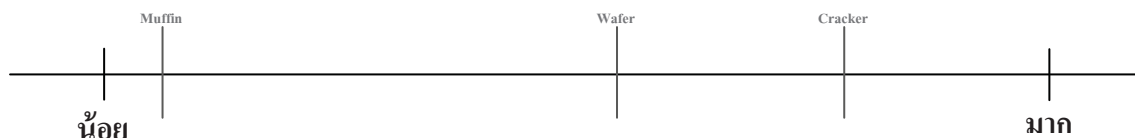
กรุณาล้างปากด้วยน้ำเปล่าก่อนทำการทดสอบตัวอย่างถัดไป

รหัสตัวอย่าง

ความแข็ง (Hardness)



ความเปราะ (Brittleness)



ความเหนียวติดภายในช่องปาก (Sticky mouth coating) *หมายเหตุ ความเหนียวที่ติดปากและฟัน



...ขอบคุณค่ะ...