



รายงานการวิจัย

การพัฒนา pH-Sensing Film โดยใช้แอนโทไซยานินจากข้าวกำเพื่อ
ประยุกต์ใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์ฉลาด

Development of pH-Sensing Film with Anthocyanin from Purple
Sticky Rice as an Indicator for Intelligent Packaging

คณะผู้วิจัย

ดร. พุดกรอง พันธุ์อุโมงค์

ผศ. ดร. ตระกูล พรหมจักร

ผศ. ดร. กิตติศาสตร์ กระบวน

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณเงินรายได้ปี พ.ศ. 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

การพัฒนา pH-Sensing Film โดยใช้แอนโทไซยานินจากข้าวเก่าเพื่อ
ประยุกต์ใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์ฉลาด

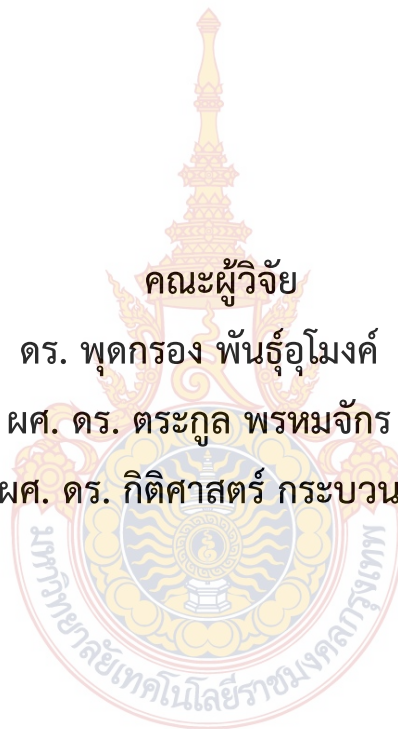
Development of pH-Sensing Film with Anthocyanin from Purple
Sticky Rice as an Indicator for Intelligent Packaging

คณะผู้วิจัย

ดร. พุดกรอง พันธุ์อุ้มงค์

ผศ. ดร. ตระกูล พรหมจักร

ผศ. ดร. กิตติศาสตร์ กระบวน



โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณเงินรายได้ปี พ.ศ. 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ทุนสนับสนุนงบประมาณรายได้ปี พ.ศ. 2562 ในการทำวิจัย ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่และเครื่องมือวัดสีในทำการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์ และสุดท้ายขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

คณะผู้วิจัย

2563



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาฟิเอชอินดิเคเตอร์ฟิล์มจากแอนโทไซยานินที่สกัดจากข้าวกล้า (*Oryza sativa* L.) สำหรับประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฉลาด ทำการศึกษาหาสูตรฟิล์มพื้นฐานที่เหมาะสมสองสูตร ได้แก่ ไคโตซาน (0.5-2%)/พีวีเอ (1%) และเมทิลเซลลูโลส (0.5-1.5%)/ไคโตซาน (1%) พบว่า การเตรียมฟิล์มโดยใช้เมทิลเซลลูโลส 1.5% ร่วมกับไคโตซาน 1.0% และขึ้นรูปโดยวิธี casting technique โดยใช้โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG 400) เป็นพลาสติกเทเซอร์ มีความเหมาะสมมากที่สุดโดยฟิล์มมีความเหนียว ยืดหยุ่นเล็กน้อย และสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้ง่าย จากนั้นแอนโทไซยานินที่สกัดจากข้าวกล้า (10-30%) จะถูกนำมาผสมลงในส่วนผสมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมทิลเซลลูโลส/ไคโตซาน ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และการตอบสนองต่อค่าฟิเอชในสารละลายฟิเอชมาตรฐาน (1-12) และในตัวอย่างอาหาร (ปลาหางแข็ง เนื้อสันในไก่ และสับปะรดหั่นชิ้น) ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานิน (10-30%) มีความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นและมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง การเติมสารสกัดแอนโทไซยานินโครงสร้างของฟิล์มแข็งแรงและมีความเป็นผลึกมากขึ้น โดยมีค่าแรงต้านทานการดึงขาดมากขึ้นและร้อยละการยืดตัวของฟิล์มลดลง ฟิเอชอินดิเคเตอร์ฟิล์มสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟิเอชในสารละลายฟิเอชมาตรฐานที่อยู่ในช่วง 1-12 ได้ โดยมีสีอยู่ในช่วงสีแดง (pH 1.0) ถึงสีเหลือง (pH 12.0) เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างอาหารในสภาวะเร่ง ($36 \pm 2^{\circ}\text{C}$) ฟิล์มสามารถบ่งชี้การเสื่อมคุณภาพของอาหารได้ โดยเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนอมชมพู (สีเริ่มต้นของฟิล์ม) ไปเป็นสีน้ำตาลเข้มอมส้ม (ปลาหางแข็ง) สีน้ำตาลเข้มอมเทา (เนื้อสันในไก่) และสีส้มอ่อน (สับปะรดหั่นชิ้น) จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้าลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของเมทิลเซลลูโลส/ไคโตซาน สามารถประยุกต์ใช้เป็นฟิเอชอินดิเคเตอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์ฉลาดได้

คำสำคัญ: ฟิเอชอินดิเคเตอร์ฟิล์ม แอนโทไซยานิน ข้าวกล้า ไคโตซาน เมทิลเซลลูโลส

Abstract

This research aimed to develop a colorimetric pH-sensing film with anthocyanin from purple sticky rice (*Oryza sativa* L.) for application in an intelligent packaging. The two basic of film formulas, e.g., chitosan (0.5-2%)/PVA (1%) and methyl cellulose (0.5-1.5%)/chitosan (1%), were studied. The film conducted through solution casting technique prepared by 1.5% methyl cellulose in combination with 1% chitosan using poly ethylene glycol (PEG 400) as a plasticizer was the most suitable method. Film was tough, slightly pliable and could be easily peeled off. Then, anthocyanin extract (10-30%) from purple sticky rice was incorporated into methylcellulose/chitosan film. The physical, mechanical and pH-sensing properties of films in standard pH solution (1-12) and food samples (torpedo scad, chicken tenderloin and fresh-cut pineapple) were investigated. Film incorporated with anthocyanin extract (10-30%) showed an increase of film thickness and decrease of water vapor permeability. Adding anthocyanin in film matrix was found to be able to strengthen the films network and exhibited more rigid. Films also showed positive response in standard pH solutions ranged from pH 1-12 which were changed from red (pH 1.0) to yellow (pH 12.0) color. During storage of food samples in accelerated condition ($36 \pm 2^\circ\text{C}$), films could detect the food deterioration which the color changed from brown-pink (initial color) to dark brown-orange (torpedo scad), dark brown-gray (chicken tenderloin) and light orange (fresh-cut pineapple). This study revealed the benefits of anthocyanin extract from purple sticky rice incorporated into methylcellulose/chitosan based films had a potential material as pH-indicator for intelligent packaging.

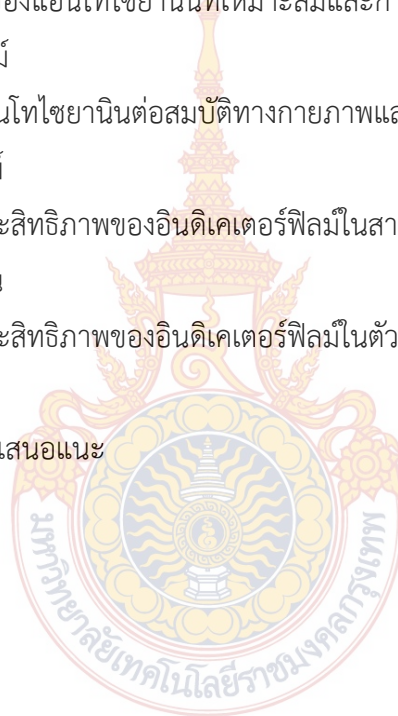
Keywords: pH-indicator film, Anthocyanin, Purple sticky rice, Chitosan, Methyl cellulose

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ข้าวก่ำและแอนโทไซยานิน	4
2.2 บรรจุภัณฑ์ฉลาด	7
2.3 การพัฒนาฟิล์มอัจฉริยะที่บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์	9
2.4 ไคโตซาน	13
2.5 เมทิลเซลลูโลส	14
2.6 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	16
2.7 ฟิล์มโพลีเมอร์ผสม (Composite films)	17
2.8 การขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธี Solvent casting	18
2.9 การเสื่อมเสียของอาหาร	19
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	25
3.1 วัสดุเกษตร	25
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	25
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์	26
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ	33
3.6 สถานที่ทำการทดลองและรวบรวมข้อมูล	33
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	34
4.1 ผลการศึกษาสูตรและสัดส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐาน	34
4.1.1 ฟิล์มที่เตรียมจากโคโตนและเมทิลเซลลูโลส	34
4.1.2 ฟิล์มที่เตรียมจากโคโตนและพีวีเอ	36
4.2 ผลการศึกษาสัดส่วนของแอนโทไซยานินที่เหมาะสมและการศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์ม	39
4.2.1 สัดส่วนของแอนโทไซยานินต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม	39
4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเคเตอร์ฟิล์มในสารละลายพีเอชมาตรฐาน	42
4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเคเตอร์ฟิล์มในตัวอย่างอาหาร	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการทดลอง	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก	54
ภาคผนวก ข	56
ภาคผนวก ค	60



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวไทยสีม่วงบางชนิด	5
2.2 ชนิดของพอลิเมอร์ธรรมชาติ	10
2.3 การพัฒนาฟิล์มที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีการรายงานใน 5 ปี ย้อนหลัง	12
3.1 สูตรพื้นฐานของฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานร่วมกับเมทิลเซลลูโลส	27
3.2 สูตรพื้นฐานของฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานระดับต่างๆ ร่วมกับพีวีเอ	28
3.3 แสดงช่วงของ Hue angle ในระบบ CIE Lch	32
4.1 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากไคโตซานร่วมกับเมทิล เซลลูโลส 1 และ 2%	34
4.2 ลักษณะของฟิล์มไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลสสูตรต่างๆ	35
4.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากไคโตซาน 1 และ 2% ร่วมกับพีวีเอ 1%	36
4.4 ลักษณะของฟิล์มไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลสสูตรต่างๆ	37
4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์มและเปรียบเทียบความใสและความขุ่นของ ฟิล์มสองสูตรที่เหมาะสม	38
4.6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากเมทิลเซลลูโลส (1.5%) และ ไคโตซาน (1%) ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวเก่า 10-30%	40
4.7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากเมทิลเซลลูโลส (1.5%) และไคโต ซาน (1%) ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวเก่า 10-30%	42
4.8 ค่าสี L^* a^* b^* Chroma Hue angle และ ΔE ของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่ เติมแอนโทไซยานินจากข้าวเก่า 30% ในสารละลายพีเอชมาตรฐาน 2-	44

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ต้นข้าวเหนียวเก่า	4
2.2 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน	6
2.3 โครงสร้างของแอนโทไซยานินที่เป็นปัจจัยในการควบคุมสี	7
2.4 ตัวอย่างผลผลิตอัจฉริยะที่ใช้บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของเวลาและอุณหภูมิ	8
2.5 การเปลี่ยนสีของฟิล์มโคโตซาน-พีวีเอ-แอนโทไซยานิน (กะหล่ำปลีสีม่วง) ที่เป็นอติเคเตอร์บ่งชี้ค่าพีเอชสำหรับอาหาร	10
2.6 การเปลี่ยนสีของฟิล์มนาโนเซลลูโลส-แอนโทไซยานิน (กะหล่ำปลีสีม่วง) ที่เป็นอติเคเตอร์บ่งชี้ค่าพีเอชสำหรับอาหาร	11
2.7 การบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงพีเอชของเนื้อหมูของพีเอชอินดิเคเตอร์ที่เตรียมจากเอการ์-แป้งมันฝรั่ง ที่เติมสารสกัดจากมันฝรั่งสีม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลาต่างๆ	11
2.8 การบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำนมพาสเจอร์ไรส์ของฟิล์มโคโตซาน-พีวีเอที่เติมสารสกัดจากกะหล่ำปลีสีม่วงที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลาต่างๆ	12
2.9 โครงสร้างของโคตินและโคโตซาน	14
2.10 โครงสร้างทางเคมีของเทิลเซลลูโลส	15
2.11 โครงสร้างทางเคมีของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์	16
2.12 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มโดยวิธี Solvent casting และปัจจัยที่ต้องควบคุม	18
2.13 การผลิตฟิล์มโดยวิธี Solvent casting ในระดับอุตสาหกรรม	19
3.1 ข้าวเหนียวเก่าพันธุ์พื้นเมือง	25
4.1 ฟิล์มโคโตซาน/เมทิลเซลลูโลส ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวเก่าในปริมาณ 10 20 และ 30%	39
4.2 รูปแสดงหน้าตัดขวาง (a และ b) ที่กำลังขยาย 1,500x และพื้นผิวที่ กำลังขยาย 200x (c และ d) ของฟิล์มสูตรมาตรฐานที่เตรียมจากเมทิลเซลลูโลสและโคโตซาน (a และ c) เปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวเก่าในปริมาณ 30% (b และ d)	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 ประสิทธิภาพของฟิล์มไคโตซาน-พีวีเอที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า ในปริมาณ 30% ที่ค่าพีเอช 1-12 ในสารละลายพีเอชมาตรฐาน โดยแถว ที่ 1-4 จากซ้ายไปขวาแสดงดังนี้ [1] pH 1 2 และ 3 [2] pH 4 5 และ 6 [3] pH 7 8 และ 9 [4] pH 10 11 และ 12	43
4.4 สีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30% เมื่อ ปลาหางแข็งเกิดการเน่าเสีย เมื่อทดสอบโดยไม่สัมผัส (แถวบน) และ สัมผัสกับอาหาร (แถวล่าง)	46
4.5 สีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30% เมื่อ เนื้อสันในไก่เกิดการเน่าเสีย เมื่อทดสอบโดยไม่สัมผัส (แถวบน) และ สัมผัสกับอาหาร (แถวล่าง)	46
4.6 สีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30% เมื่อ สับปะรดหั่นชิ้นเกิดการเน่าเสีย เมื่อทดสอบโดยไม่สัมผัส (แถวบน) และ สัมผัสกับอาหาร (แถวล่าง)	47
ก1 การสู่วัดความหนาของฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์	55
ก2 ตัวอย่างก่อน (A) และระหว่างการวัดการละลายน้ำของฟิล์ม (B)	55
ข1 ข้าวที่สกัดด้วยสารละลายสกัดอัตราส่วน 1:10 (A) การกรอง (B) และสาร สกัดที่กรองแล้ว (C)	57
ข2 การลอกฟิล์มออกจากแม่พิมพ์	57
ข3 ฟิล์มสูตรมาตรฐานไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลส	58
ข4 ฟิล์มไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลสที่เติมสารสกัดจากข้าวกล้า 10%	58
ข5 ฟิล์มไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลสที่เติมสารสกัดจากข้าวกล้า 20%	59
ข6 ฟิล์มไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลสที่เติมสารสกัดจากข้าวกล้า 30%	59
ค1 ประสิทธิภาพของฟิล์มไคโตซาน-พีวีเอที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้าใน ปริมาณ -30% ที่ค่าพีเอช 1-12 ในสารละลายพีเอชมาตรฐาน โดยแถวที่ 1-4 จากซ้ายไปขวาแสดงดังนี้ [1] pH 1 2 และ 3 [2] pH 4 5 และ 6 [3] pH 7 8 และ 9 [4] pH 10 11 และ 12	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ค3 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเตอร์ฟิล์มในปลาหางแข็ง ที่ บรรจุในกล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิท	62
ค4 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเตอร์ฟิล์มในเนื้อสันในไก่ ที่ บรรจุในกล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิท	63
ค5 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเตอร์ฟิล์มในสับปะรดหั่นชิ้น ที่ บรรจุในกล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิท	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์เป็นตลาดที่มีแนวโน้มการเติบโตสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งในภาคอุตสาหกรรม เคมี อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีรายงานแนวโน้มการเติบโตของตลาดของกลุ่มบรรจุภัณฑ์แบบอ่อนตัว เช่น ถาดและฟิล์ม จะเพิ่มขึ้นถึง 9 ล้านล้านบาท ภายในปี 2020 (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2559) เนื่องมาจากปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุอาหาร ทำให้ผู้ผลิตและผู้บริโภคหันมาตระหนักถึงความสำคัญของสิ่งแวดล้อมมากขึ้น มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาถึงการนำวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้เป็นฟิล์มหรือบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น สตาร์ช เซลลูโลส และไคโตซาน เป็นต้น (Siracusa *et al.*, 2008)

คุณภาพและความปลอดภัยของอาหารยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคในปัจจุบันให้ความสำคัญ เนื่องมาจากรูปแบบในการใช้ชีวิตของผู้บริโภคสมัยใหม่เปลี่ยนแปลงไป การเข้าถึงข้อมูลต่างๆ ได้ง่ายและสะดวกรวดเร็วจึงทำให้ผู้บริโภคตระหนักถึงความปลอดภัยและคุณค่าทางโภชนาการของอาหารมากขึ้น โดยเฉพาะอาหารพร้อมบริโภค (ready to eat) ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสดใหม่และคงคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงกับวัตถุดิบสด อย่างไรก็ตาม อาหารเหล่านี้มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นและต้องเก็บรักษาในสภาวะควบคุมอุณหภูมิ เช่น อาหารพร้อมบริโภคที่วางขายตามชั้นวางสินค้าควบคุมอุณหภูมิในซูเปอร์มาร์เกตต่างๆ แต่การที่ต้องอยู่บนชั้นวางสินค้าเป็นระยะเวลานานย่อมจะทำให้ความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์ลดลงตามระยะเวลาการวางจำหน่ายที่นานขึ้น บรรจุภัณฑ์ฉลาด (Intelligent packaging) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อช่วยบอกความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์แก่ผู้บริโภค ช่วยให้ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างสะดวกและปลอดภัยมากขึ้น (ปิยวรรณ, 2553) ซึ่งตามคำนิยาม บรรจุภัณฑ์ฉลาด หมายถึงชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่สามารถประเมินคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร และส่งข้อมูลดังกล่าวแก่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ แตกต่างจากบรรจุภัณฑ์แบบทั่วไปที่มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการบรรจุและปกป้องอาหารจากสิ่งแวดล้อมภายนอก (Luchese *et al.*, 2017)

บรรจุภัณฑ์ฉลาดส่วนใหญ่นิยมใช้เซนเซอร์ในการตรวจวัดที่แสดงข้อมูลที่สามารถมองเห็นได้แก่ผู้บริโภค เช่น ข้อมูลการขนส่ง การปรากฏหรือไม่ปรากฏของสี เป็นต้น โดยชนิดที่ใช้พีเอชอินดิเคเตอร์สำหรับอาหารไม่ควรก่อให้เกิดพิษ และสามารถตอบสนองต่อพีเอชในช่วงต่างๆ ได้หลากหลาย ซึ่งวิธีการ

วัดการเปลี่ยนสีของพีเอชอินดิเคเตอร์ฟิล์มเป็นวิธีที่ง่ายต่อการมองเห็นด้วยสายตา ทั้งนี้ เนื่องจากอาหารเมื่อเกิดการเสื่อมเสียขึ้นค่าพีเอชของอาหารก็จะเปลี่ยนแปลงไป มีรายงานการใช้สารสกัดแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีสีม่วง (Pereira *et al.*, 2015; Silva-Pereira *et al.*, 2015) ผีวองุ่น (Golasz *et al.*, 2013) ดอกชงโค (Zhang *et al.*, 2014) และดอกกุหลาบ (Shukla *et al.*, 2016) เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในโพลีเมอร์หลายชนิด อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาถึงการใช้สารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวก่ำซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยในโพลีเมอร์ผสมของไคโตซานร่วมกับเมทิลเซลลูโลสหรือ PVA เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของพีเอช เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษา อีกทั้ง ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากข้าวก่ำพันธุ์พื้นเมืองของไทยอีกทางหนึ่ง ซึ่งไม่นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหารหลัก แต่นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารหวาน เช่น ขนมไทยต่างๆ

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาเกี่ยวกับการผลิตฟิล์มจากไคโตซานร่วมกับเมทิลเซลลูโลส เปรียบเทียบกับไคโตซานและ PVA ที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวก่ำ เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ตรวจวัดการเสื่อมเสียของอาหาร โดยทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์มในสารละลายมาตรฐานพีเอชต่างๆ และในตัวอย่างอาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาชนิดและสัดส่วนของโพลีเมอร์ในการเตรียมฟิล์มที่เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฉลาด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนของแอนโทไซยานินที่สกัดจากข้าวก่ำในการผลิตฟิล์มเพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฉลาด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์มเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฉลาด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสูตรพื้นฐานและสัดส่วนของฟิล์ม 2 สูตร ได้แก่ ไคโตซาน (1.0%) ผสมเมทิลเซลลูโลส (0.5 1.0 และ 1.5%) และไคโตซาน (0.5 1.0 และ 2.0%) ผสมพีวีเอ (1.0%)
- 1.3.2 ศึกษาสัดส่วนของแอนโทไซยานินที่สกัดจากข้าวก่ำที่เหมาะสม (10-30%) ในการผลิตฟิล์มเพื่อประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ฉลาด
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมได้ ได้แก่ ความหนา แรงต้านทานการดึงขาด การซึมผ่านของไอน้ำ และสัมฐานวิทยา

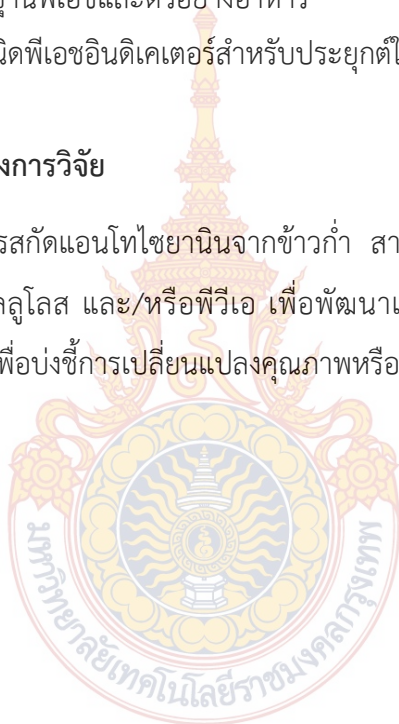
- 1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน (พีเอช 1-12) และในตัวอย่างอาหาร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้สูตรฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับสารเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐาน
- 1.4.2 ได้สัดส่วนของแอนโทไซยานินจากข้าวกล้าที่เหมาะสมและทราบประสิทธิภาพของฟิล์มในสารละลายมาตรฐานพีเอชและตัวอย่างอาหาร
- 1.4.3 ได้ฟิล์มต้นแบบชนิดพีเอชอินดิเคเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ฉลาด

1.5 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การใช้ประโยชน์จากสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า สามารถนำมาผสมลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของไคโตซานและเมทิลเซลลูโลส และ/หรือพีวีเอ เพื่อพัฒนาเป็นพีเอชอินดิเคเตอร์ฟิล์ม สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ฉลาด เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพหรือการเสื่อมเสียของอาหารได้



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวดำและแอนโทไซยานิน

ข้าวเหนียวดำ หรือเรียกตามภาษาพื้นเมืองของทางเหนือว่า ข้าวดำ เป็นการเรียกตามลักษณะสีของเมล็ดที่มีสีม่วงดำ หรือแดงดำ นิยมปลูกมากในภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ของประเทศไทย มีหลากหลายสายพันธุ์มากกว่า 42 สายพันธุ์ เช่น ก่ำดอยสะเก็ด ก่ำมก้อย ก่ำหนองบัวลำภู และก่ำเพชรบูรณ์ เป็นต้น ลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากข้าวทั่วไปที่เห็นอย่างชัดเจนคือการปรากฏของสีม่วงบนส่วนต่าง ๆ ของต้น เช่น กาบใบ แผ่นใบ กลีบดอก เปลือกเมล็ด และเยื่อหุ้มเมล็ด เป็นต้น ปริมาณของสีม่วงจะเข้มข้นแตกต่างกันไป เป็นลักษณะเฉพาะประจำพันธุ์ซึ่งตามภูมิปัญญาท้องถิ่นข้าวดำไร้จะมีลักษณะสีม่วงเฉพาะส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดเท่านั้น ในขณะที่ข้าวดำนา จะมีลักษณะสีม่วงปรากฏอยู่ในส่วนอื่น ๆ ของลำต้นด้วย (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ต้นข้าวเหนียวดำ

ที่มา: เพ็ญพิชญา (2555)

สีม่วงที่ปรากฏขึ้นบนส่วนต่างของต้นข้าว เกิดจากรงควัตถุแอนโทไซยานินโดยมีไซยานิดิน (cyanidin) เป็นองค์ประกอบเรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (Anthocyanidin) มีตั้งแต่สีชมพู แดง จนถึง สีม่วง ม่วงแดง และม่วงดำ หรือสีน้ำเงิน สำหรับในข้าวดำ แอนโทไซยานิดินที่ทำให้เกิดสีเป็นสีม่วงอ่อน จนถึงม่วงแดงเข้ม หรือแดงดำ คือ cyanidin-3-glucoside และ peonidin-3-glucoside ดังนั้น จึงเรียกข้าวชนิดนี้ว่า “ข้าวดำ (Purple Rice)”

แอนโทไซยานินดิน มีคุณค่าทางด้านสมุนไพรคือนอกจากจะพิสูจน์ว่าสามารถมีปฏิกิริยาในด้านการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) แล้วแอนโทไซยานินดิน ที่สกัดได้จากข้าวดำพันธุ์พื้นเมืองของไทยยังมีสารอาหารอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณค่าต่อสุขภาพคือ แกมมาโอริโซนอล (Gamma Oryzanol) เป็นสารประกอบที่พบมากเป็นสองเท่าในรำข้าวดำ เมื่อเทียบกับรำข้าวอื่นๆ มีคุณสมบัติในการลด ความเสี่ยงของการเกิดโรค atherosclerosis และมีคุณสมบัติในการต้านการออกซิเดชัน คล้ายกับสารต้านอนุมูลอิสระ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น วิตามิน เอ และ ซี และมีความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตเซลล์ใหม่ และเพิ่มการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันต่อสิ่งแปลกปลอม ช่วยป้องกันโรคหัวใจ ลดคอเรสเตอรอล ลดน้ำตาลในเลือด ดังนั้น พันธุ์ข้าวดำพื้นเมืองของไทยจึงถือเป็นแหล่งพันธุกรรมข้าวที่สำคัญชนิดหนึ่ง (หน่วยวิจัยข้าวดำ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555) ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวไทยบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.1

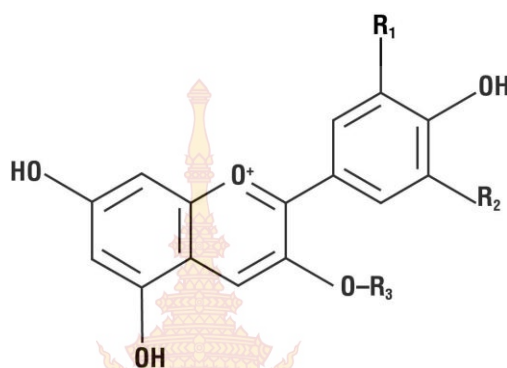
ตารางที่ 2.1 ปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวไทยสีม่วงบางชนิด

สายพันธุ์	ปริมาณแอนโทไซยานิน	หมายเหตุ
Chiang Mai black rice	5.69 ± 0.28 mg/g of extract	Cy-3-glu
Hawm Nil	1.08 ± 0.06 mg/L of extract	Cy-3-glu
Hawm Ubon	~30/75 mg/g dry basis	TAC*
Kham Doisaket	9.95 ± 0.04 mg/g of FW	Cy-3-glu
Mali Nil Surin No.6	64.50 ± 0.20 mg/100 g of rice	TAC
Niaw Dam	17.89 - 99.53 mg/100 g of rice	TAC in germinated rice
Niaw Dam Pleuak Khao	137.41 ± 16.66 mg/100 g DM	Cy-3-glu
Niaw Dam Pleuak Dam	19.39 ± 0.09 mg/100 g DM	Cy-3-glu
Niaw Dam Doi Hang	5.172 ± 0.6 mg/mL of extract	TAC
Niaw Dam Payao	1.247 ± 0.3 mg/mL of extract	TAC
Red Jasmine	~15/80 mg/g dry basis	TAC
Sang Yod Phattalung	0.128 ± 0.0 mg/mL of extract	TAC
Sang Yod Songkla	0.097 ± 0.0 mg/mL of extract	TAC

หมายเหตุ: * TAC = Total Anthocyanin Content

ที่มา : ดัดแปลงจาก Sivamaruthi *et al.* (2018)

สารประกอบฟีนอลิกหลักในข้าวท่าไทย คือ แอนโทไซยานิน โดยเฉพาะ cyanidin-3-glucoside และ peonidin-3-glucoside, malvidin, pelargonidin-3,5-diglucoside, cyanidin-3-glucoside และ cyanidin-3,5-diglucoside; cyanidin-3-glucoside, pelargonidin-3-glucoside (Rerkasem *et al.*, 2015) โครงสร้างพื้นฐานของแอนโทไซยานินประกอบด้วยวงแหวนเบนโซไพแรน (benzopyran) สองวงต่อกันวงแหวนฟีนิล (phenyl ring) มีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.2



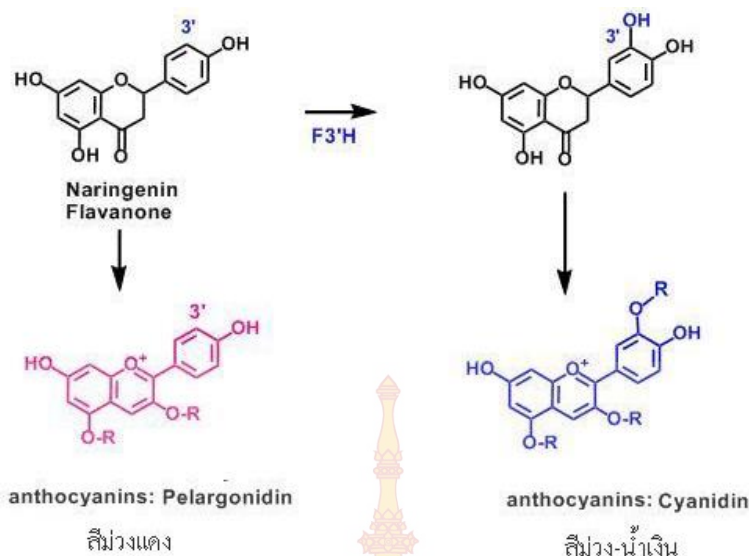
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน

ที่มา: พิมพ์เพ็ญและนิธิยา (2018)

สีของแอนโทไซยานินในดอกไม้ ผลไม้บางชนิด ใบหรือลำต้นของพืชบางชนิดที่มีสีตั้งแต่สีแดงถึงน้ำเงินเข้ม ในสภาพที่เป็นกรดมีค่า pH ต่ำกว่า 3 (เป็นกรดสูง) จะทำให้แอนโทไซยานินมีสีแดง ในสภาพที่ค่อนข้างเป็นกลาง หรือมีค่า pH ประมาณ 7-8 แอนโทไซยานินจะมีสีม่วง และเมื่อสภาพเป็นเบสหรือมีค่า pH มากกว่า 11 (เป็นเบสสูง) แอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน นอกจากนี้ ความคงตัวของแอนโทไซยานินจะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้น แสง และอุณหภูมิอีกด้วย (นิธิยา, 2549) กล่าวโดยสรุปแล้ว สีของแอนโทไซยานินจะถูกควบคุมด้วยปัจจัย 2 อย่าง คือ โครงสร้างทางเคมี และพีเอช

1) โครงสร้าง หากในโครงสร้างวงแหวนฟีนิลมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่เมทอกซิล (-OCH₃) เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อสีแอนโทไซยานิน เช่น การเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้มากขึ้นจะทำให้มีสีเข้มขึ้น และสีจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินมากด้วย และการเพิ่มหมู่เมทอกซิลแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 5' จะทำให้มีสีแดงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.3)

2) พีเอช พีเอชของสารละลายที่แอนโทไซยานินละลายอยู่ มีผลต่ออัตราการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ทำให้สีเปลี่ยนไปได้ ตัวอย่างเช่น ไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุสีแดงที่พบในเชอร์รี่และแครนเบอร์รี่ จะเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นน้ำเงินเมื่อพีเอชเปลี่ยนจาก 3 เป็น 11 (นิธิยา, 2549)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแอนโทไซยานินที่เป็นปัจจัยในการควบคุมสี
ที่มา: พิมพ์เพ็ญและนิธิยา (2018)

2.2 บรรจุกฎภัณฑ์ฉลาด (Intelligent packaging)

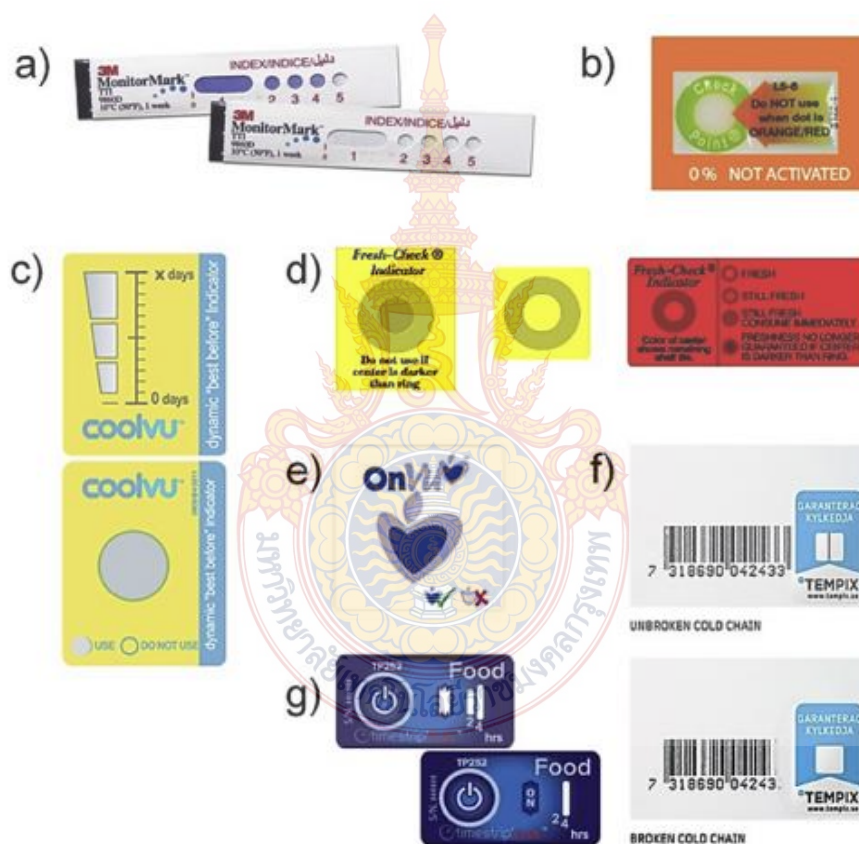
บรรจุกฎภัณฑ์แบบฉลาดคือ บรรจุกฎภัณฑ์ที่มีฉลากซึ่งสามารถตรวจติดตาม คุณภาพของผลิตภัณฑ์ บอกรสชาติและกลิ่นภายใน/ ภายนอกภาชนะบรรจุ และให้ข้อมูลเกี่ยวกับผู้ผลิต ผู้กระจายสินค้า ผู้ค้าปลีก และผู้บริโภคติดอยู่หรือ พิมพ์อยู่บนบรรจุกฎภัณฑ์ แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ได้แก่

2.2.1 ฉลากอัจฉริยะแบบป้ายอิเล็กทรอนิกส์ อาร์เอฟไอดี (RFID Tag)

RFID ย่อมาจากคำว่า Radio Frequency Identification เป็นป้ายที่สามารถอ่านค่าได้ โดยผ่านคลื่นวิทยุจากระยะห่าง เพื่อตรวจ ติดตาม และบันทึกข้อมูลที่ติดอยู่กับป้าย ซึ่งนำไปฝังไว้ในหรือติดอยู่กับวัตถุต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ กล่อง หรือสิ่งของใดๆ สามารถติดตาม ข้อมูลของวัตถุหนึ่งชิ้นว่าคืออะไร ผลิตที่ไหน ใคร เป็นผู้ผลิต ผลิตอย่างไร ผลิตวันไหน และเมื่อไร ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่ขึ้นและแต่ละชิ้นมาจาก ที่ไหน รวมทั้งตำแหน่งของวัตถุนั้นๆ ในปัจจุบันว่า อยู่ส่วนใดในโลก โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการสัมผัส หรือเห็นวัตถุนั้นๆ ก่อน

แถบป้าย RFID มีข้อได้เปรียบเหนือกว่า ระบบบาร์โค้ดหลายอย่าง เช่น ความละเอียด เพราะ สามารถบรรจุข้อมูลได้มากกว่าจึงทำให้สามารถแยก ความแตกต่างของสินค้าแต่ละชิ้นได้ความเร็ว ในการ อ่านข้อมูลจากแถบป้าย RFID ยังรวดเร็วกว่าการ อ่านข้อมูลจากแถบบาร์โค้ดหลายสิบเท่า อีกทั้ง ยัง สามารถอ่านข้อมูลได้พร้อมกันหลายแถบ RFID สามารถส่งข้อมูลไปยังเครื่องรับได้โดยไม่ต้อง

นำไปจ่อในมุมที่เหมาะสมเหมือนการใช้เครื่องอ่าน บาร์โค้ด (Non-Line of Sight) สามารถเขียนทับข้อมูลได้จึงทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งจะ ลดต้นทุนของการผลิตป้ายสินค้า สามารถขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการอ่านข้อมูลซ้ำที่อาจเกิดขึ้นจากระบบ บาร์โค้ด ความเสียหายของป้ายชื่อ (Tag) น้อยกว่า เนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดไว้ภายนอกบรรจุภัณฑ์ ระบบความปลอดภัยสูงกว่าทำให้ปลอมแปลงและลอกเลียนแบบได้ยาก นอกจากนี้ยังทนทานต่อความ เปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน และการกระทบกระแทกอีกด้วย (ปิยวรรณ, 2553)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างฉลากอัจฉริยะที่ใช้บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature indicators) a). Monitor Mark™ by 3M (สหรัฐอเมริกา) ; b) Fresh-Check® by Lifelines Technologies Inc. (สหรัฐอเมริกา); c) CoolVu™ by Freshpoint (สวีตเซอร์แลนด์); d) Checkpoint® by Vitsab International AB (สวีเดน); e) OnVu™ by Freshpoint (สวีตเซอร์แลนด์); f) Tempix® by Tempix AB (สวีเดน); and g) Timestrip® by Timestrip Plc (สหราชอาณาจักร) ที่มา: Ghaani *et al.* (2016)

2.2.2 ฉลากอัจฉริยะที่บ่งชี้ (Indicators) คุณภาพของผลิตภัณฑ์

ฉลากอัจฉริยะที่บ่งชี้ (Indicators) คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในช่วงแรกมีการพัฒนาฉลากเพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะในการจัดเก็บผลิตภัณฑ์ เช่น อุณหภูมิ เวลา ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูล ทางอ้อมที่บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำให้รู้ถึงระยะ เวลาที่ผลิตภัณฑ์นั้นคงอยู่ได้ ตัวอย่างเช่น การใช้ ฉลากบอกอุณหภูมิวิกฤติ ฉลากบอกเวลา-อุณหภูมิ (Time-Temperature Indicators; รูปที่ 2.4) หรือ ฉลากบอกถึงการรั่วซึมของบรรจุภัณฑ์ ต่อมาจึงมีการพัฒนา ฉลากบ่งชี้แบบที่บอก โดยตรงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการให้ข้อมูลที่ชี้ชัดเจาะจงไปถึงองค์ประกอบ ต่างๆ ที่ถูกปลดปล่อย ออกมาจากผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อม สภาพ ตัวอย่างเช่น สารประกอบ ต่างๆ ที่ระเหยออก มาจากผลิตภัณฑ์ เช่น กรดที่เป็นสารอินทรีย์ แอลกอฮอล์ สารประกอบไนโตรเจน สารประกอบ ซัลฟิวริก เชื้อแบคทีเรีย ที่อกซิน ฯลฯ (ปิยวรรณ, 2553)

2.2.3 เซ็นเซอร์ (Sensors)

ฉลากอัจฉริยะที่เป็นเซ็นเซอร์ ได้แก่ เซ็นเซอร์จุลินทรีย์ (Bio-sensors) และเซ็นเซอร์ แก๊ส (Gas sensors) (ปิยวรรณ, 2553)

2.3 การพัฒนาฟิล์มอัจฉริยะที่บ่งชี้ (Indicators) คุณภาพของผลิตภัณฑ์

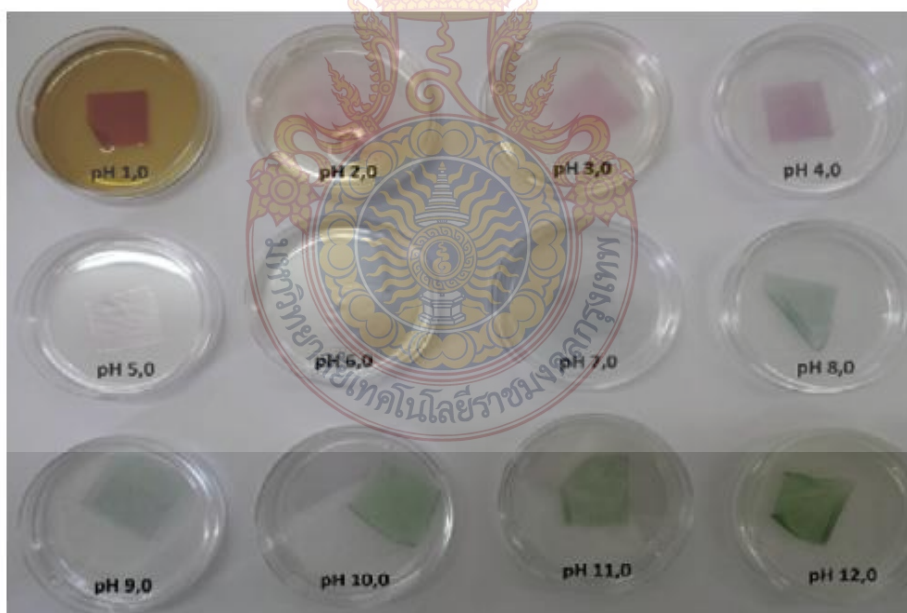
จากการรายงานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฟิล์มที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในระดับ ห้องปฏิบัติการอาศัยหลักการเคมี เอนไซม์ หรือจุลินทรีย์ จะเห็นว่างานวิจัยใหม่ๆ มุ่งเน้นถึงการใช้ ประโยชน์จากโพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น สตาร์ช และไคโตซาน รวมถึงการใช้ประโยชน์ จากสารสกัดทางธรรมชาติ เช่น เคอร์คูมิน เพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ หรือแอนโทไซยานินเพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ ที่ได้จากธรรมชาติ โพลีเมอร์ธรรมชาติมีหลากหลายชนิดแบ่งได้ตามแหล่งที่มา ได้แก่ โพลีเมอร์ที่ได้จาก สัตว์ พืช จุลินทรีย์ สาหร่าย และฟังไจ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

รายงานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฟิล์มที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แสดงในตารางที่ 2.3 ไม่กี่ปี ที่ผ่านมามีรายงานการใช้สารสกัดจากแอนโทไซยานินจากธรรมชาติ โดยสกัดจากวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ กะหล่ำปลีม่วง โดยผสมลงไปในสารละลายโพลีเมอร์ผสมแตกต่างกันได้แก่ ไคโตซาน-พีวีเอ (รูปที่ 2.5) และเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์จากแบคทีเรีย (รูปที่ 2.6) พบว่าสามารถใช้บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ในช่วง 1-12 ได้ และสามารถนำไปบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในเนื้อหมู (รูปที่ 2.7) และน้ำมันพาสเจอร์ไรส์ (รูปที่ 2.8) ในระหว่างการเก็บรักษาที่เวลาต่างๆ ได้

ตารางที่ 2.2 ชนิดของพอลิเมอร์ธรรมชาติ

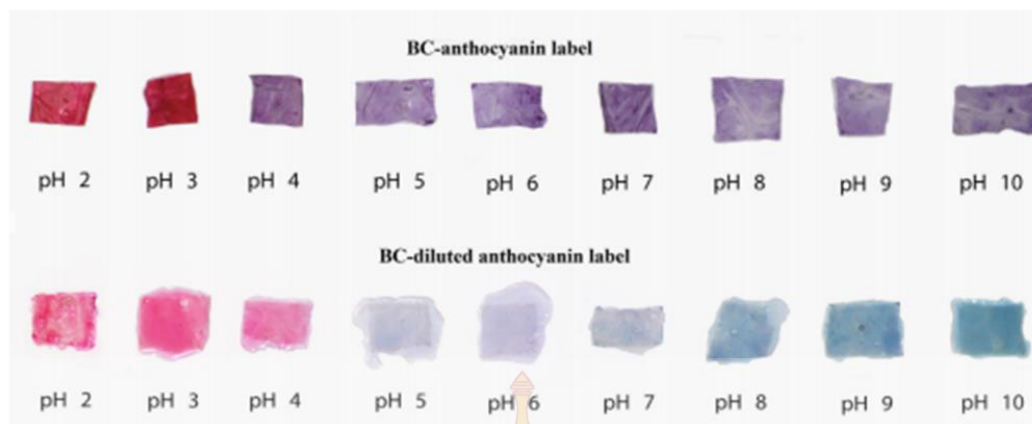
แหล่งที่มา	ชนิดของพอลิเมอร์
สัตว์	Gelatin, hyaluronan, chitin
พืช	Cellulose, starch, hemicellulose, agar, pectin, guar gum, psyllium, gum acacia, lignin
จุลินทรีย์	Xanthan, gellan, hyaluronan, curdlan
สาหร่าย	Carrageenan, alginate, agar
ฟังไจ	Schizophyllan, cardlan, scleroglucan, pullulan, chitin

ที่มา: Deb *et al.* (2019)



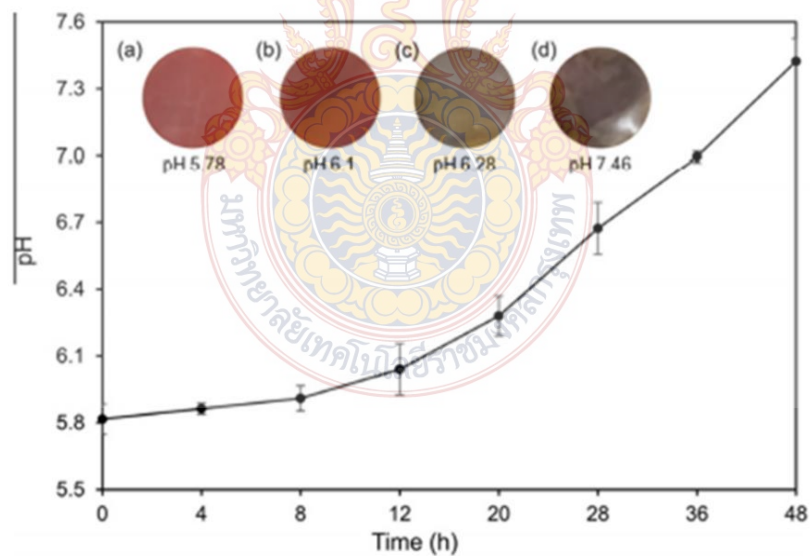
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนสีของแอนโทไซยานิน (กะหล่ำปลีสีม่วง) อินดิเคเตอร์บ่งชี้ค่าพีเอชสำหรับอาหาร

ที่มา: Pereira *et al.* (2015)

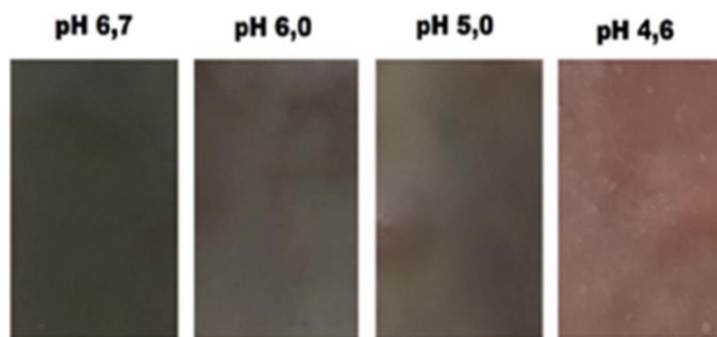


รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนสีของแอนโทไซยานิน (กะหล่ำปลีสีม่วง) อินดิเคเตอร์บ่งชี้ค่าพีเอชสำหรับอาหาร

ที่มา: Pourjavaher *et al.* (2017)



รูปที่ 2.7 การบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงพีเอชของเนื้อหมูของพีเอชอินดิเคเตอร์ที่เตรียมจากเอการ์-แป้งมันฝรั่งที่เติมสารสกัดจากมันฝรั่งสีม่วงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลาต่างๆ ที่มา: Choi *et al.* (2017)



รูปที่ 2.8 การบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำนมพาสเจอร์ไรส์ของฟิล์มไคโตซาน-พีวีเอที่เติมสารสกัดจากกะหล่ำปลีสีม่วงที่อุณหภูมิ 25°C ที่เวลาต่างๆ ที่มา: Pereira *et al.* (2015)

ตารางที่ 2.3 การพัฒนาฟิล์มที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีการรายงานใน 5 ปีย้อนหลัง

ระบบตรวจวัด	การประยุกต์ใช้	เอกสารอ้างอิง
สตาร์ชมันฝรั่ง-PVA-แอนโทไซยานิน (มันฝรั่งสีม่วง)-ลิโมนีน	น้ำนม	Liu <i>et al.</i> , 2017
ทารากัม-PVA-เคอร์คูมิน	กุ้ง	Ma <i>et al.</i> , 2017
กลีเซอรอลไตรบิวทิลเรต - ไลเปส (<i>Aspergillus niger</i>)	ผักและผลไม้บางชนิด	Wu <i>et al.</i> , 2015
ไคโตซาน-PVA-แอนโทไซยานิน (กะหล่ำปลีสีม่วง)	เนื้อปลาและหอย	Pereira <i>et al.</i> , 2015
ไคโตซาน-สตาร์ชข้าวโพด-แอนโทไซยานิน (กะหล่ำปลีสีม่วง)	น้ำนม	Silva-Pereira <i>et al.</i> , 2015
ไคโตซาน-เพคติน-แอนโทไซยานิน (องุ่น)	-	Maciel <i>et al.</i> , 2015
ไคโตซาน-แอนโทไซยานิน (ดอกขงโค)	เนื้อปลาและเนื้อหมู	Zhang <i>et al.</i> , 2014
แลคติกแอซิดแบคทีเรียไมโครอูนาทของแคลเซียมแอลจีเนต	ผลิตภัณฑ์เนื้อ	Choi <i>et al.</i> , 2014
PEGylated laccase - 2,2'-azino-bis	กิมจิ	Kang <i>et al.</i> , 2014
Polydiacetylene -SiO ₂ - surfactant	-	Nopwinyuwong <i>et al.</i> , 2014
เอนไซม์อัลคาไลน์ไลเปส-PVA	น้ำนม	Lu <i>et al.</i> , 2013
Ag shell - Au nanorod	-	Zhang <i>et al.</i> , 2013
PDA - Silica nanocomposites	-	Nopwinyuwong <i>et al.</i> , 2012

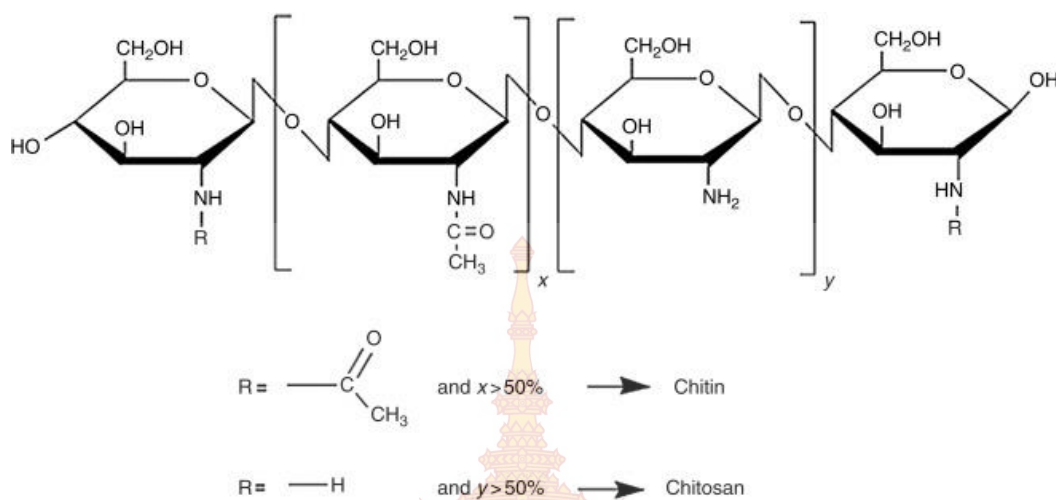
ที่มา: ดัดแปลงจาก Ghaani *et al.* (2016)

2.4 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซานเป็นเป็นอนุพันธ์หนึ่งของไคตินซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่พบมากเป็นอันดับสองที่พบบนโลก ไคตินเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำ ไคโตซานเป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของ N-acetyl-D-glucosamine เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β (1-4) glycosidic ไคโตซานมีสมบัติในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์จึงนิยมนำมาใช้ในการผลิตฟิล์มหรือใช้เป็นสารเคลือบผิวอาหาร ผัก และผลไม้ (Goldberg *et al.*, 1990) ไคโตซานมีสมบัติเป็นประจุบวก (natural cationic polysaccharide) โดยกลไกในการยับยั้งจุลินทรีย์เนื่องมาจากประจุบวกในโมเลกุลของไคโตซานทำปฏิกิริยากับประจุลบในเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารภายในเซลล์แบคทีเรียออกมานอกเซลล์ (Zivanovic *et al.*, 2005) นอกจากนี้สมบัติไคโตซานซึ่งเป็นประจุบวกจะส่งเสริมคุณสมบัติเชิงกลที่ดีของฟิล์มและยังช่วยยับยั้งการแพร่ผ่านของออกซิเจนผ่านฟิล์มได้ดี (Goldberg *et al.*, 1990)

คุณสมบัติของฟิล์มที่ได้จากไคโตซานจะขึ้นอยู่กับแหล่งของไคโตซาน (น้ำหนักโมเลกุล และ degree of deacetylation) ตัวทำละลาย สภาวะในการทำแห้ง ระยะเวลาในการเก็บรักษา อุณหภูมิ เป็นต้น น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานที่สูงขึ้น จะปรับปรุงความแข็งแรงของฟิล์มแต่ไม่มีผลกระทบต่อ การแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์ม (water vapour permeability; WVP) (Park *et al.*, 2002) ช่วยส่งเสริมการก่อฟิล์ม (film forming ability) โดยทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล และช่วยดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดีกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Cervera *et al.*, 2004) ฟิล์มไคโตซานที่มี degree of deacetylation ต่ำ จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ และมีค่า tensile strength สูงกว่าฟิล์มที่มีค่า degree of deacetylation สูง ไคโตซานมีสมบัติที่ไม่ละลายในน้ำแต่จะสามารถละลายได้ในสารละลายกรด เช่น สารละลายกรดแอสติค สารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดฟอร์มิก ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.2-100 โดยปริมาตร รวมถึงสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและไนตริก ซึ่งสามารถละลายได้เล็กน้อย (สุกิจ, 2542) โดยไคโตซานที่มี degree of deacetylation สูงจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช เมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น degree of deacetylation ก็จะลดลง ไคโตซานที่มี degree of deacetylation สูงจะมีหมู่อะมิโนมากจึงสามารถละลายในสารละลายกรดได้ดีกว่า degree of deacetylation ต่ำ (Kim *et al.* 2006) พฤติกรรมการไหลของสารละลายไคโตซานจะเป็นแบบ pseudoplastic คือเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนความหนืดของสารละลายจะลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน นอกจากนี้ ความหนืดของสารละลายยังขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้กำจัดหมู่แอสติล น้ำหนักโมเลกุล อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลาย การใช้

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงๆ และใช้ระยะเวลาในการกำจัดกลุ่มแอสีทิลนานขึ้นส่งผลให้ความหนืดของสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว (สุกิจ, 2542)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน

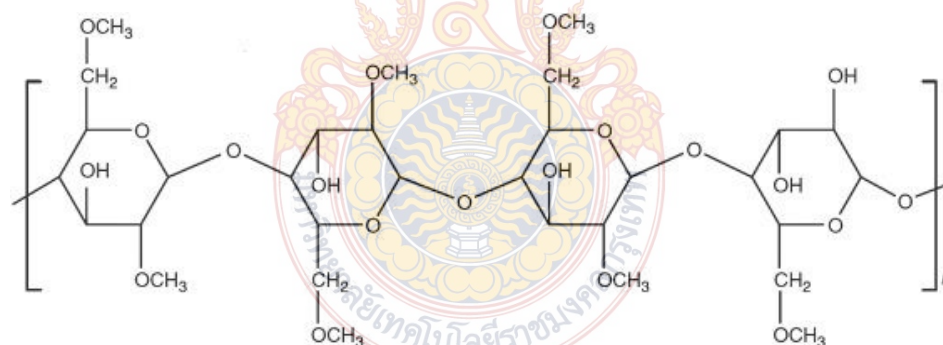
ที่มา: Shaari and Kamarudin (2015)

2.5 เมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose, MC)

เซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติที่พบมากที่สุดในโลก เมทิลเซลลูโลสเป็นไฮโดรคอลลอยด์กึ่งสังเคราะห์ ซึ่งได้จากอนุพันธ์ของเซลลูโลสซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยการแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมที่หมู่ไฮดรอกซิลด้วยหมู่เมทิล ด้วยปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) ดังรูปที่ 2.10 (นิริยา, 2549) จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถถูกแทนที่ได้ด้วยปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน จะเรียกว่า degree of substitution (DS) โดยแต่ละหน่วยย่อยของกลูโคสจะมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันได้ 3 หมู่ เมื่อหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ 1 หมู่ จะหมายความว่ามี DS=1 และถ้าถูกแทนที่ทั้ง 3 หมู่ จะหมายความว่ามี DS=3 ซึ่งเมทิลเซลลูโลสในทางการค้าจะมีค่า DS อยู่ในช่วง 1.5-2.0 (สุกิจ, 2542)

โดยปกติแล้วเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ดังนั้นการละลายน้ำของเซลลูโลสจึงต่ำมาก เมื่อหมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่เมทิลในโมเลกุลของเมทิลเซลลูโลส พันธะไฮโดรเจนจึงลดลงและเพิ่มความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้าง ส่งผลให้น้ำและตัวทำละลายอื่นๆ สามารถเข้าเกิดปฏิกิริยาและล้อมรอบสายโซ่ได้ง่ายได้ ทำให้เพิ่มละลายและการพองตัวในน้ำ (สุกิจ, 2542) เมทิลเซลลูโลสมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความ

เหนียว ความยืดหยุ่นให้แก่ฟิล์ม และสามารถละลายน้ำได้ ฟิล์มที่ได้จากเมทิลเซลลูโลสจะมีความโปร่งแสง และต้านทานน้ำมัน มีคุณสมบัติในการเป็นเยื่อเลือกผ่านของแก๊สออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์และ สารประกอบอะโรมาติก ดังนั้น จึงช่วยชะลอการหายใจของผักและผลไม้ได้ เมทิลเซลลูโลสมีคุณสมบัติที่เป็นไฮโดรฟิลิกเนื่องจากในโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จึงมีความสามารถในการต้านทานการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำ ดังนั้นจึงสามารถป้องกันการควบแน่นของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ได้ (Park and Chinnan, 1995) ค่า WVP ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสมีค่าสูงกว่าฟิล์มสังเคราะห์ 25-500 เท่า อย่างไรก็ตาม ค่า WVP ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสมีค่าน้อยกว่าฟิล์มไฮโดรฟิลิกที่ได้จากสตาร์ช เคซีน และกลูเตนจากข้าวสาลี (Turhan and Sahbaz, 2004) ดังนั้น เพื่อลดความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำที่สูง จึงนิยมนำมาผสมกับลิปิดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ WVP ผลของน้ำหนักโมเลกุลของเมทิลเซลลูโลสต่อความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำพบว่า ค่า WVP จะมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเลกุลมีการเคลื่อนที่ได้น้อยลง ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของไอน้ำลดลงด้วย (Ayranci *et al.*, 1997)



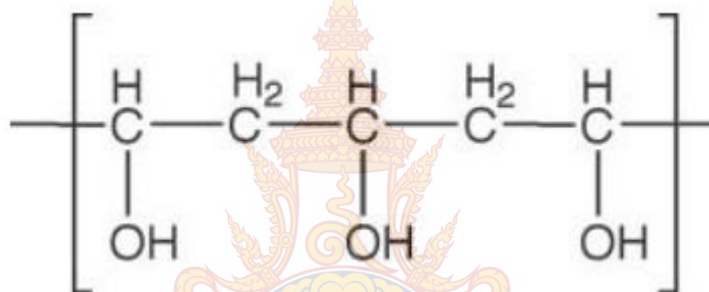
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลเซลลูโลส

ที่มา: Brady *et al.* (2017)

เมทิลเซลลูโลสแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ pseudoplastic กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนความหนืดของสารละลายจะลดลง โดยไม่ขึ้นกับเวลา และพฤติกรรมการไหลจะเข้าใกล้แบบ Newtonian มากขึ้น เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นต่ำและมีความหนืดต่ำ สารละลายเมทิลเซลลูโลสโดยทั่วไปจะเสถียรที่ค่าพีเอช 3-10 ถ้าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 3 จะเกิดปฏิกิริยา acid-catalyzed hydrolysis ส่งผลให้กลูโคสแต่ละหน่วยในสารโพลีเมอร์ขาดออกจากกัน แต่ที่พีเอชมากกว่า 10 จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง (สุกิจ, 2542)

2.6 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA)

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) หรือพีวีเอ เป็นโพลีเมอร์สังเคราะห์โมเลกุลใหญ่ และละลายได้ดีในน้ำ (hydrophobic polymer) ในทางการค้าสังเคราะห์ขึ้นมาจากไวนิลอะซีเตท (vinyl acetate) ทำให้ได้โพลีเมอร์ระหว่างไวนิลแอลกอฮอล์และไวนิลอะซีเตท ดังนั้น ปริมาณในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis level) จึงมีอิทธิพลต่อสมบัติของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ได้แก่ โครงสร้างผลึก และสมบัติการละลายในน้ำ ซึ่งในทางการค้าจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 87-99 ความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและระดับของการไฮโดรไลซิสลดลง และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะทำให้สารละลายมีความหนืดต่ำ (สุรศักดิ์, 2543)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

ที่มา: Brady *et al.* (2017)

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความต้านทานต่อน้ำ น้ำมัน และสารละลายต่างๆ ได้ดีมาก มีความทนต่อแรงดึง แรงฉีก การกระแทก มีความยืดหยุ่นและมีคุณสมบัติการกั้นการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนสูง (Flieger *et al.*, 2003) คุณสมบัติของ PVA จะขึ้นอยู่กับระดับของการไฮโดรไลซิสและมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ (DeMerlis *et al.*, 2003) ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบแผ่นฟิล์มของ PVA นอกจากสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หีบห่อทั่วไปแล้ว ยังนำไปใช้ทางด้านอื่นๆ ได้แก่ ด้านการแพทย์ สิ่งทอ และการเกษตร (ดารณี และปิยะนุช, 2557) ใช้เป็นตัวประสานและเพิ่มความเสถียรของอิมัลชันในกาว ใช้ในการเคลือบไซกระดาก และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโพลีไวนิลบิวทิล (polyvinyl butyryl; PVB) ซึ่งใช้เป็นตัวยึดในกระจกนิรภัยระหว่างชั้นต่างๆ และใช้ทำเป็นแผ่นฟิล์มที่ละลายน้ำเพื่อบรรจุหีบห่อ สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกนิยมนำมาใช้ในเป็นตัวประสานเพื่อการขึ้นรูป เนื่องจากมีคุณสมบัติในการละลายได้ดีในน้ำ และเมื่อสลายตัวด้วยความร้อนแล้วไม่มีพิษ (สุรศักดิ์, 2543)

มีการรายงานถึงการพัฒนาฟิล์มที่เป็นโพลีเมอร์ผสมของ PVA หลายชนิด เช่น แอลจินेट (Aykara *et al.*, 2006) เมทิลเซลลูโลส (Park *et al.*, 2001) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (ดารณี และปิยะนุช, 2557)

โคโตซาน (Pereira *et al.*, 2015) และสตาร์ช (Silva-Pereira *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการละลายน้ำ และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Jayasekara และคณะ (2004) ศึกษาเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จาก PVA กับแป้ง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่าฟิล์มมีความยืดหยุ่นและพอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้ ในระดับโมเลกุล แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PVA และแป้งยังคงมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำ เพื่อลดอัตราการละลายน้ำ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยโคโตซานเพื่อที่จะทำให้ฟิล์มมีคุณสมบัติการละลายน้ำลดลง

2.7 ฟิล์มโพลีเมอร์ผสม (Composite films)

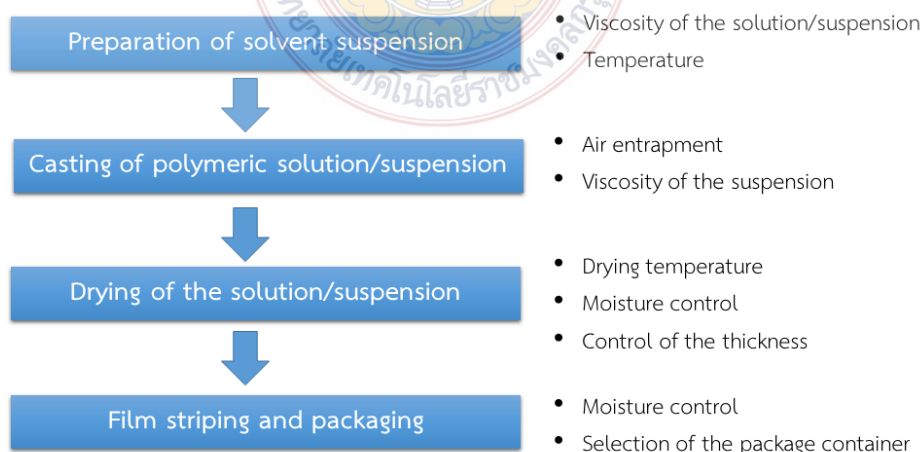
ฟิล์มโพลีเมอร์ผสมถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม โดยทั่วไปแล้วฟิล์มที่ผลิตโดยโพลีเมอร์ชนิดเดียวมักจะมีคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของสสารหรือมีลักษณะทางกายภาพที่ดีเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง ฟิล์มจากโพลีแซคคาไรด์และโปรตีนมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดี อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้จากโพลีแซคคาไรด์และโปรตีนมีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ฟิล์มที่เตรียมจากลิปิดมีสมบัติต้านทานความชื้นได้ดีแต่มีข้อจำกัดคือมีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นสมบัติทางกายภาพและสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของสสารของฟิล์ม (barrier properties) จึงขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติทางกายภาพและเคมีของโพลีเมอร์แต่ละชนิด

การศึกษาของ Gracia และคณะ (2004) รายงานว่าเมทิลเซลลูโลสสามารถละลายได้สมบูรณ์ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 และ 100 องศาเซลเซียส ในขณะที่โคโตซานมีคุณสมบัติในการละลายน้ำต่ำ Ayranci and Tunc (2001) รายงานว่าการชนิดของกรดไขมัน (fatty acid) ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อคุณสมบัติในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส โดยอัตราการซึมผ่านของไอน้ำจะลดลงเมื่อปริมาณกรดไขมันที่ใช้ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น และการใช้กรดสเตียริกปริมาณน้อยๆ (กรดสเตียริก 5 กรัม ต่อ เมทิลเซลลูโลส 100 กรัม) จะไปลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลสได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของกรดไขมัน และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กรดไขมันที่มีคาร์บอนสายยาว เช่น กรดลอริก (C12) กรดปาล์มิติก (C16) และกรดสเตียริก (C18) ตามลำดับ กรดไขมันที่มีสายยาวมากก็จะมีโมเลกุลขนาดใหญ่และไปจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลและมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น การเติมกรดสเตียริกลงในสารละลายโพลีเมอร์ผสมของโคโตซานและเมทิลเซลลูโลสจะไปลดอัตราการละลายน้ำและหากใช้ในปริมาณที่มากกว่า 15% สมบัติทางกายภาพของฟิล์มจะลดลงด้วย (Coma *et al.*, 2003; Moller *et al.*, 2004)

มีการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานและพีวีเอ ในด้านการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพได้แก่ แรงต้านทานการฉีกขาด (tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (elongation) และการทนความร้อน การศึกษาของ Abraham และคณะ (2016) รายงานว่าการเตรียมฟิล์มจากไคโตซานและพีวีเอโดยใช้ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารช่วยให้เกิดการเชื่อมข้าม (crosslink) ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความคงตัวต่อความร้อนและลดอัตราการละลายมากกว่าการใช้โพลีเมอร์ผสมระหว่างไคโตซาน-พีวีเอ-กลีเซอรอล และไคโตซาน-พีวีเอ ความคงตัวต่อความร้อนเนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างหมู่อัลดีไฮด์ (-CHO-) ของฟอร์มัลดีไฮด์กับหมู่เอมีน (-NH₂-) ในโมเลกุลของไคโตซาน เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของฟิล์มไคโตซาน-พีวีเอ จะลดลงเมื่อมีสัดส่วนของพีวีเอเพิ่มมากขึ้น และการเติมกลีเซอรอลลงไปในส่วนผสมส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มมากขึ้นแต่มีแรงต้านทานการฉีกขาดลดลง

2.8 วิธีการขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธี Solvent casting

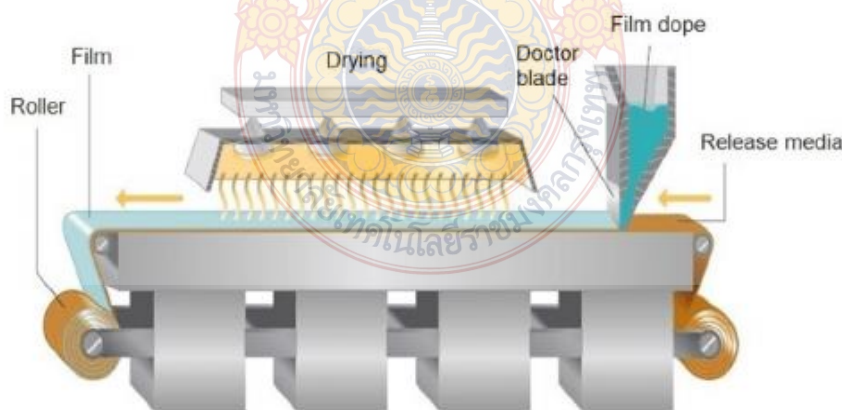
การขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธี solvent casting เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มโดยการละลายโพลีเมอร์หรือโพลีเมอร์ชนิดผสมในตัวทำละลายที่เหมาะสม จากนั้นทำการเทลงบนพิมพ์หรือภาชนะต่างๆ ที่จะใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม ระเหยเอาตัวทำละลายออกโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีนี้คือ ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ อัตราส่วนของโพลีเมอร์ผสม ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ระเหยตัวทำละลาย ชนิดและปริมาณของพลาสติกไทเซอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มโดยวิธี Solvent casting และปัจจัยที่ต้องควบคุม

ที่มา: ดัดแปลงจาก Karki *et al.* (2016)

ในขั้นตอนการผลิตจะส่งผลให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นจำนวนมาก ดังนั้นจะต้องมีการกำจัดเอาฟองอากาศออกจากสารละลาย เพื่อความเป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม หลังจากนั้นฟิล์มจะถูกทิ้งไว้ให้แห้ง เมื่อแห้งแล้วจะนำมาฟิล์มมาตัดให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ ในทางอุตสาหกรรมการเก็บรักษาฟิล์มระหว่างรอตัดอาจทำได้โดยการม้วนไว้กับ roll stick (รูปที่ 2.13) อย่างไรก็ตาม ไม่ควรทิ้งฟิล์มไว้นาน เนื่องจากจะเสียหายได้ง่าย และเมื่อตัดแล้วควรบรรจุและเก็บรักษาทันที ข้อดีของวิธีการนี้คือ เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ราคาถูก และทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่เตรียมได้จากวิธีการนี้มักจะเปราะและแตกหักได้ง่ายในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้มีค่าร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (elongation) ลดลง เนื่องจากการระเหยเอาตัวทำละลายออกจากฟิล์มโดยใช้ระยะเวลาเวลานานเกินไป ปัญหาที่สำคัญของวิธีการนี้คือ การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ในหลายประเทศจึงมีกฎระเบียบที่เข้มงวดเกี่ยวกับการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าว การนำผลการทดลองในระดับปฏิบัติการไปใช้ในการผลิตถือว่าเป็นสิ่งที่มีความท้าทาย ทั้งนี้เนื่องจากตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิต เช่น ความร้อน อัตราเร็วในการผสม และอุณหภูมิ ล้วนส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์ม ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาในระดับปฏิบัติการ คือ ความเร็วในการ casting ระยะเวลาในการทำแห้ง และความหนาสุดท้ายของฟิล์ม (Karki *et al.*, 2016)



รูปที่ 2.13 การผลิตฟิล์มโดยวิธี Solvent casting ในระดับอุตสาหกรรม

ที่มา: Karki *et al.* (2016)

2.9 การเสื่อมเสียของอาหาร

การเสื่อมเสียของอาหาร หมายถึง การเสื่อมหรือการลดลงของคุณภาพอาหารทางด้านกายภาพ เช่น สี กลิ่นรส รสชาติ และเนื้อสัมผัส นอกจากนี้ยังสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ ทำให้อาหารไม่เป็นที่

ต้องการ ไม่ปลอดภัย หรือไม่ยอมรับของผู้บริโภค การเสื่อมเสียของอาหารมีสาเหตุได้ทั้งทางกายภาพ ทางเคมีจากปฏิกิริยาเคมี และจุลินทรีย์ สามารถแบ่งประเภทของอาหารตามความง่ายแก่การเสื่อมเสียได้ดังนี้

1) **อาหารที่เสื่อมเสียง่าย** (perishable food) เป็นอาหารที่มีความชื้นสูง (high moisture food) และมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (water activity) สูงกว่า 0.9 ได้แก่ อาหารสด เช่น นำนม เนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ สัตว์น้ำ และอาหารทะเล เป็นต้น อาหารในกลุ่มนี้หากไม่ถูกเก็บรักษาอย่างเหมาะสม จะเสื่อมเสียอย่างรวดเร็วภายใน 1-2 วัน หรือ ไม่เกิน 1 สัปดาห์ การเสื่อมเสียทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย (microbial spoilage) และจุลินทรีย์ให้ก่อโรค (pathogen)

2) **อาหารที่เสื่อมเสียเร็วปานกลาง** เป็นอาหารที่มีความชื้นปานกลาง (Intermediate moisture food) เช่น ไข่ ผลไม้ประเภทผลแห้ง (มะขาม และมะพร้าว) พืชหัวที่มีเปลือกหุ้ม (หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง มันเทศ) เพื่อป้องกันการเข้าทำลายจากจุลินทรีย์และแมลง จึงทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารไว้ได้เป็นระยะเวลาหนึ่งและจะเกิดการเน่าเสียได้ภายใน 1-2 สัปดาห์

3) **อาหารที่เน่าเสียได้ยาก** เป็นอาหารที่มีความชื้นต่ำ (low moisture food) และมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีน้อยกว่า 0.6 อาหารกลุ่มนี้เป็นอาหารแห้ง เช่น แป้ง สตาร์ช ธัญพืช ถั่วเมล็ดแห้ง น้ำตาล ซึ่งสามารถเก็บรักษาไว้ได้เป็นระยะเวลานาน แต่อย่างไรก็ตาม อาหารอาจมีการดูดความชื้นกลับได้ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศสูง การป้องกันทำโดยการใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและไอน้ำที่เหมาะสม สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษาอาหารให้มีความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ต่ำ (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2563)

2.9.1 การเสื่อมเสียของอาหารทางกายภาพ

การเสื่อมเสียของอาหารทางกายภาพเป็นการเสื่อมเสียเนื่องจากแรงทางกายภาพ เช่น การแตกหัก การชำรุด ที่มีสาเหตุมาจากแรงกล ได้แก่ แรงการกระแทก แรงอัด แรงเจาะ ระหว่างการเก็บเกี่ยว การขนส่ง การแปรรูป และการเก็บรักษา การงอกของพืชหัว และการกัดกินของแมลง ซึ่งแรงทางกลที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์จะเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดรอยชำรุดหรือเกิดบาดแผลได้ ซึ่งถ้าบาดแผลมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีอาการหายใจที่สูงขึ้น มีการคายแก๊สเอทิลีนออกจากผลและมีบทบาทในการกระตุ้นอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์ อัตราการหายใจที่สูงขึ้นนี้เร่งให้มีการเสื่อมเสียได้ง่ายจากจุลินทรีย์และเอนไซม์ตามมา การเสื่อมเสียทางกายภาพนี้อาจเกิดกับผักและผลไม้สดพร้อมบริโภค ที่มีขั้นตอนการแปรรูปเช่น การปอกเปลือก หรือการหั่นชิ้น ซึ่งทำให้เนื้อเยื่อที่ยังมีชีวิตเกิดบาดแผล

การเสื่อมเสียทางกายภาพอาจเกิดเนื่องมาจากกระบวนการแปรรูป เช่น การแช่เยือกแข็ง ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่แทงเซลล์ทำให้เซลล์ฉีกขาด และเมื่อนำมาละลายอาหารจะสูญเสียของเหลว

(drip loss) สารอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ ก็จะสูญเสียไปกับของเหลวนี้ด้วย อีกกรณีหนึ่ง เช่น การเก็บรักษาอาหารในสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันการผ่านเข้าออกของน้ำได้ไม่ดี ในอาหารสดหรืออาหารแช่เยือกแข็ง ทำให้ระเหยออกได้ ส่งผลให้สูญเสียน้ำหนัก ผิวหน้าแห้ง หรือในกรณีอาหารแห้ง น้ำจะซึมผ่านบรรจุภัณฑ์เข้าไปได้ อาหารจะดูดน้ำกลับเข้าไป ทำให้มีความชื้นเพิ่มขึ้น สูญเสียความกรอบ หรือเกาะตัวกันเป็นก้อน และยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ตามมา (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2563)

2.9.2 การเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากเอนไซม์และเคมี

เอนไซม์เป็นโปรตีนที่พบในสิ่งที่มีชีวิต ทั้งพืชและสัตว์ มีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งที่มีชีวิต เช่น การสลายโมเลกุลของสารอาหารที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง รวมทั้งเร่งการสังเคราะห์สารต่างๆ ภายในเซลล์ เมื่อพืชและสัตว์ ถูกเก็บเกี่ยวหรือฆ่าเพื่อนำเนื้อสัตว์มาใช้เป็นอาหาร เอนไซม์ที่ยังคงทำหน้าที่อยู่ เป็นการเร่งการสลายโมเลกุลของอาหาร เช่น เร่งให้ผลไม้สุก สีเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง เปลี่ยนสตาร์ชให้เป็นน้ำตาล ทำให้ผลไม้มีรสหวาน และมีเนื้อนิ่มลง ในระหว่างการเตรียมวัตถุดิบ อาหารอาจถูกปกเปิดออก หั่น สับ บด ทำให้เอนไซม์ในอาหารสัมผัสกับโมเลกุลของซัสเตรต มากขึ้น จึงเร่งให้เกิดการเสื่อมเสียได้เร็วขึ้น ตัวอย่างเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาเคมีในอาหารได้แก่

2.9.2.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (enzymatic browning reaction) ได้แก่ ฟีนอลเลส (phenolase) พอลิฟีนอลเลส (polyphenolase) พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้ จะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลซึ่งพบในผัก ผลไม้ เช่น กกล้วย แอปเปิล มันฝรั่ง เปลือกมะพร้าวอ่อน เปลี่ยนเป็นสารที่มีสีน้ำตาล โดยเฉพาะเมื่อผักและผลไม้พวกนี้ถูกปกเปิดเปลือก และหั่นขึ้นให้สัมผัสกับออกซิเจน

2.9.2.2 เอนไซม์ลิปเอส (lypase) และ เอนไซม์ลิปอกซิเดส (lypoxidase) เป็นเอนไซม์ที่เร่งการย่อยสลายไขมัน พบทั่วไปในอาหาร เป็นสาเหตุทำให้น้ำมัน เนื้อสัตว์ พืช และอาหารสด ที่มีไขมันสูงเกิดกลิ่นหืน โดยเอนไซม์นี้จะ เร่งการย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ หากกรดไขมันอิสระสายสั้น มีโมเลกุลเล็ก ระเหยได้ง่าย ให้กลิ่น รส กรดไขมันอิสระที่ไม่อิ่มตัว จะเกิดการแตกตัวต่อไปเกิดเป็นสารที่มีกลิ่นเหม็นหืน

2.9.2.3 เอนไซม์เพกทิเนส (pectinase) จะเร่งการ ย่อยสลายเพกทิน (pซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ ที่เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้โครงสร้างเซลล์ของผักและผลไม้แข็งแรง ทำให้ผักและผลไม้มีเนื้อนิ่ม

นอกจากนี้ เอนไซม์เพกทิเนสยังทำให้น้ำผักผลไม้ที่คั้นสดที่ตั้งทิ้งไว้แยกชั้น ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเหมือนที่คั้นใหม่ (พิมพ์เพ็ญและนิริยา, 2563)

2.9.3 การเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์

การเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์เป็นการเสื่อมเสียของอาหารที่มีสาเหตุหลักคือจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์และรา ซึ่งเกิดการปนเปื้อนและเพิ่มจำนวนขึ้นในอาหาร แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่ทำให้คุณภาพอาหารเปลี่ยนไปจนไม่เป็นที่ยอมรับ การเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์อาจเป็นอันตรายต่อการบริโภค หากเป็นการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ (food poisoning) จำนวนจุลินทรีย์มีผลต่อการเน่าเสียของอาหารแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของอาหาร แต่โดยทั่วไปจำนวนจุลินทรีย์ ซึ่งตรวจพบทำให้เกิดสี กลิ่น และรสชาติผิดปกติ ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคมีจำนวนประมาณ 10^6 - 10^9 cfu /กรัม หรือต่อมิลลิลิตร หรือตารางเซนติเมตร แต่ในผลิตภัณฑ์อาหารหมักจะมีปริมาณจุลินทรีย์สูงเป็นปกติแต่ไม่จัดเป็นการเน่าเสียของอาหาร เพราะทำให้เกิดคุณลักษณะที่ต้องการในอาหาร ในกรณีที่อาหารมีจุลินทรีย์ก่อโรคปริมาณของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดอาการของโรค ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ ซึ่งเรียกว่า infective dose เชื้อแบคทีเรียก่อโรคบางชนิด เช่น *Shigella* มีปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคต่ำมาก คือ มี infective dose เพียง 10-100 cfu/g ของอาหารก็ทำให้เกิดอาการของโรคได้ แต่แบคทีเรียก่อโรคบางชนิดมีปริมาณ infective dose สูง ถึง 10^9 cfu /กรัม

ลักษณะการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์อาจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติ (off-flavour) เช่น เกิดสารระเหยที่มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวและรสเปรี้ยวจากกรดอินทรีย์ กลิ่นแอลกอฮอล์ กลิ่นเหม็นเน่าเหมือนอุจจาระจากสาร indole กลิ่นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดฟองแก๊ส การเปลี่ยนสี แบคทีเรียบางพวกสร้างรงควัตถุได้ เช่น สารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) และแบคทีเรียโคลอโรฟิลล์ (bacteriochlorophyll) การเกิดเมือกที่ผิวเกิดจากแบคทีเรียที่มีแคปซูล (capsule) ซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ เมื่อแบคทีเรียเจริญเพิ่มจำนวนมากขึ้นในอาหาร ทำให้อาหารเกิดลักษณะเป็นเมือกเหนียวยืด

อาหารที่มีโปรตีนสูง เช่น เนื้อสัตว์ อาหารทะเล นม เนย ไข่ มักเสื่อมเสียเนื่องจากแบคทีเรีย ที่มีเอนไซม์ที่ย่อยโปรตีนได้ เช่น เอนไซม์โปรตีเอส (protease) ย่อยโปรตีนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดแอมิโนและย่อยสลายต่อไปเป็นสารระเหยที่มีกลิ่นเหม็น เช่น การสลายตัวของกรดแอมิโนที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ กรดแอมิโนซิสตีน (cystein) ได้แก๊ซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีกลิ่นโช้เน่า การสลายตัวของกรดแอมิโนทริพโตเฟน (tryptophan) ทำให้ได้ indole และ skatole มีกลิ่นเหม็นเน่าเหมือนอุจจาระ

อาหารที่มีไขมันสูง อาจถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่มีเอนไซม์ย่อยไขมัน (lipolytic enzyme) เช่น เอนไซม์ลิเพส (lipase) ทำให้ไตรกลีเซอไรด์ถูกย่อยเป็นโมเลกุลของกรดไขมันอิสระ ซึ่งหากเป็น

กรดไขมันที่มีสายโมเลกุลสั้นจะระเหยได้ง่าย และให้กลิ่น และกรดไขมันอิสระที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ยังทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนได้

ในอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มีเอนไซม์ซึ่งสามารถย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ทั้งโพลีแซคคาไรด์ น้ำตาลโมเลกุลคู่ และน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้เป็นกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดแล็กติก กรดแอสติก กรดบิวทริก กรดโพรพิโอนิก ทำให้อาหารมีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นเปรี้ยว และยังได้ แอซีโตน บิวทิแอลกอฮอล์ เอทิลแอลกอฮอล์ และก๊าซต่างๆ เกิดขึ้น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนทำให้มีฟองก๊าซพุ่งขึ้น หรือทำให้บรรจุภัณฑ์โป่งบวม ชนิดและสัดส่วนต่างๆ ที่เกิดขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ และชนิดของคาร์โบไฮเดรต การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตของจุลินทรีย์อาจเป็นแบบ fermentation หรือ oxidation หรืออาจย่อยสลายได้ทั้ง 2 แบบขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตแบบ fermentation เกิดขึ้นในสภาพไม่มีออกซิเจน เช่น แบคทีเรียแล็กติก (lactic acid bacteria) เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแล็กติก ส่วนการย่อยสลายแบบ oxidation เกิดขึ้นในสภาพมีออกซิเจน โดยแบคทีเรียที่ต้องการอากาศ (aerobic bacteria) ในกลุ่ม acetic acid bacteria ได้แก่ *Acetobacter* เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแอสติก (พิมพ์เพ็ญและนิธิยา, 2563)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pereira และคณะ (2015) ได้ศึกษาและพัฒนา Time-Temperature Indicators สำหรับประยุกต์ใช้บรรจุภัณฑ์ฉลาด โดยผลิตจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของโคโชนาและพีวีเอ ที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีสีม่วงในปริมาณ 25% ของสัดส่วนของสารละลายฟิล์มทั้งหมด พบว่าฟิล์มมีการตอบสนองต่อสารละลายฟิออซบัพเฟอร์ที่พีเอช 1-12 โดยมีที่ปรากฏเป็นสีแดง ชมพู ม่วง ฟ้ำ น้ำเงิน และเขียว ตามลำดับ และเมื่อนำไปทดสอบเพื่อเป็นอินดิเคเตอร์บ่งชี้การเสื่อมเสียของอาหารในตัวอย่างน้ำนมพาสเจอร์ไรส์ที่เก็บรักษาในสภาวะเร่ง (25 องศาเซลเซียส) พบว่า เมื่อน้ำนมเกิดการเสื่อมเสียค่าพีเอชจะลดลงจากเริ่มต้น คือ 6.7 เหลือ 5.0 โดยฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีเทาเข้ม

Choi และคณะ (2016) ศึกษาและพัฒนาอินดิเคเตอร์สำหรับบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่เตรียมจากอะการ์/สตาร์ช และแอนโทไซยานินจากมันฝรั่งสีม่วง โดยพบว่าอินดิเคเตอร์มีการตอบสนองต่อค่าพีเอชในช่วง 2-10 โดยมีที่ปรากฏเป็นสีแดง น้ำตาล น้ำตาลอมเขียว และเขียว ตามลำดับ และสามารถบ่งชี้การเน่าเสียของเนื้อหมูได้ โดยสีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเขียว เมื่อพีเอชของเนื้อหมูเพิ่มขึ้นจาก 5.78 เป็น 7.46

Pourjavaher และคณะ (2017) ศึกษาและพัฒนาอินดิเคเตอร์สำหรับบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช โดยใช้เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (cellulose nanofiber) จากแบคทีเรีย ร่วมกับสารสกัดจากแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีสีแดง 32 (เจือจาง) และ 193 mg L⁻¹ (ไม่เจือจาง) ผลการวิเคราะห์ FT-IR พบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์และแอนโทไซยานิน และพบว่าการเติมสารสกัดแอนโทไซยานินส่งผลให้เกิดการสูญเสียความเป็นผลึก (crystallinity) ของเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ และฟิล์มที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานิน 32 mg L⁻¹ มีการตอบสนองต่อช่วงของพีเอชที่ 2-10 ได้ดีกว่าฟิล์มที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานินที่ไม่ได้เจือจาง โดยฟิล์มมีการแสดงออกของสีในช่วงสีแดง ม่วง และน้ำเงิน ตามลำดับ



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุเกษตร

ข้าวเหนียวกำ พันธุ์พื้นเมืองซื้อมาจากผู้ผลิตที่ปลูกในหมู่บ้านเมืองจั่ง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน โดยเป็นข้าวที่ปลูกในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 และเก็บเกี่ยวในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยไม่ผ่านกรรมวิธีการหมักเพื่อกำจัดมอดและแมลงต่างๆ ขนส่งในกล่องลูกฟูกโดยรถขนส่งมายังมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ภายใน 2 วัน ทำการอบเพื่อไล่ความชื้นและเพื่อกำจัดแมลง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บรักษาตัวอย่างในกล่องพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทที่อุณหภูมิห้อง ก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 3.1 ข้าวเหนียวกำพันธุ์พื้นเมือง

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ไคโตซาน (Sigma-Aldrich, Germany)
- 2) เมทิลเซลลูโลส ความหนืด 4,000 เซนติพอยส์ (Sigma-Aldrich, Germany)
- 3) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA: เคมีภัณฑ์, ประเทศไทย) food grade
- 4) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG 400; เคมีภัณฑ์, ประเทศไทย) food grade
- 5) ไตรโซเดียมโพลีฟอสเฟต (เคมีภัณฑ์, ประเทศไทย) food grade
- 6) เอทิลแอลกอฮอล์ ความบริสุทธิ์ 99.99% (Loba, India)
- 7) กรดแอสซิติค (Loba, India)

- 8) กรดแลคติก (Loba, India)
- 9) กรดซิตริก (Loba, India)
- 10) น้ำส้มสายชูกลั่น 5% (ตรา อสร., ประเทศไทย)
- 11) พาราฟินแว็กซ์ (เคมีภัณฑ์, ประเทศไทย)
- 12) ซิลิกาเจล
- 13) น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water; วอลเลอร์ เคมีคอล, ประเทศไทย)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

- 1) จานแก้ว (Petri dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร
- 2) เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator; R-100, Buchi, Switzerland)
- 3) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Shimadzu, Bara Scientific co, Ltd, Japan)
- 4) ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven; Mit Technology Co, Ltd, Germany)
- 5) ไมโครมิเตอร์ (Winton, Japan)
- 6) เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer; Ta.xt.plus, United Kingdom)
- 7) เครื่องผสมสารแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer; HP220, Gibthai, Thailand)
- 8) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter; F20, Mettler Toledo, Switzerland)
- 9) เครื่องวัดสี (Color Quest XE; Hunter Lab, USA)
- 10) เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (ATX224; Shimadzu Corporation, Japan)
- 11) เครื่องเขย่าสาร (HS-260 basic, Ika, Germany)
- 12) ถ้วยอลูมิเนียม (Aluminum can)
- 13) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 14) ไมโครปิเปตขนาด 200 และ 1,000 ไมโครลิตร (Micropipette)
- 15) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 1,000 500 250 และ 50 มิลลิลิตร
- 16) แท่งแก้วคนสาร
- 17) คีมสแตนเลสปลายแหลมและปลายงอ
- 18) อะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil)
- 19) พาราฟิล์ม (Bemis, USA)
- 20) กระดาษทิชชู (Tissue paper)
- 21) คิวเวตชนิดควอซ์ (Cuvett)

3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การศึกษาสูตรและสัดส่วนที่เหมาะสมของโพลีเมอร์สองสูตรในการเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐาน ศึกษาสูตรพื้นฐานของฟิล์ม 2 สูตร ดังนี้

3.4.1.1 ศึกษาระดับไคโตซานและเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสม

ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากไคโตซาน (1%) ร่วมกับเมทิลเซลลูโลส (0.5-1.5%) ในการเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐาน แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1. สูตรพื้นฐานของฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานร่วมกับเมทิลเซลลูโลสระดับต่างๆ

ชุดการทดลอง	สัดส่วนของโพลีเมอร์
ชุดการทดลองที่ 1	ไคโตซาน 1.0% + เมทิลเซลลูโลส 0.5%
ชุดการทดลองที่ 2	ไคโตซาน 1.0% + เมทิลเซลลูโลส 1.0%
ชุดการทดลองที่ 3	ไคโตซาน 1.0% + เมทิลเซลลูโลส 1.5%

การเตรียมฟิล์มทำโดยเตรียมสารละลายของไคโตซาน 1% โดยชั่งไคโตซาน 1 กรัม ละลายในสารละลายกรดแอสติกความเข้มข้น 1% และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายเมทิลเซลลูโลส (0.5-1.5%) ที่เตรียมในเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 50% ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยผสมโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องผสมสารแม่เหล็กไฟฟ้า เติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG 400) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เพื่อเป็นพลาสติกไทเซอร์ ผสมจนสารละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

ตั้งสารละลายฟิล์มไว้ที่อุณหภูมิห้องจนไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ในสารละลาย (ประมาณ 1.30 ชั่วโมง) เทสารละลายฟิล์มปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงบนจานแก้ว (Petri dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร ทำการระเหยตัวทำละลายออกจากฟิล์มโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.4.1.2 ศึกษาระดับไคโตซานและพีวีเอที่เหมาะสม

ศึกษาสัดส่วนของไคโตซานที่เหมาะสม (0.5-2%) ร่วมกับ PVA (1%) ในการเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐาน แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2. สูตรพื้นฐานของฟิล์มที่เตรียมจากโคโตนระดับต่างๆ ร่วมกับพีวีเอ

ชุดการทดลอง	สัดส่วนของโพลีเมอร์
ชุดการทดลองที่ 1	โคโตน 0.5% + พีวีเอ 1.0%
ชุดการทดลองที่ 2	โคโตน 1.0% + พีวีเอ 1.0%
ชุดการทดลองที่ 3	โคโตน 2.0% + พีวีเอ 1.0%

การเตรียมฟิล์มทำโดยเตรียมสารละลายของโคโตน 0.5-2.0% โดยชั่งโคโตน 0.5 1.0 และ 2.0 กรัม ตามลำดับ ละลายในสารละลายกรดแอสติกความเข้มข้น 1% และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร สำหรับพีวีเอ 1% เตรียมโดยชั่งพีวีเอ 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ผสมโพลีเมอร์ทั้งสองเข้าด้วยกันในอัตราส่วนโคโตนและพีวีเอเท่ากับ 3:7 เติมสารละลายไตรโซเดียมโพลีฟอสเฟตความเข้มข้น 1.5% (w/v) ปริมาตร 0.1% ของส่วนผสมทั้งหมด ด้วยเครื่องผสมสารแม่เหล็กไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

ตั้งสารละลายฟิล์มไว้ที่อุณหภูมิห้องจนไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ในสารละลาย (ประมาณ 1.30 ชั่วโมง) เทสารละลายฟิล์มปริมาตร 60 มิลลิลิตร ลงบนจานแก้ว (Petri dish) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร ทำการระเหยตัวทำละลายออกจากฟิล์มในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.4.1.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างฟิล์มทั้งหมดจากทั้งสองสูตร ดังนี้

3.4.3.1 ความหนา (thickness)

วัดความหนาของฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์ (Winton, Japan) ทำโดยสุ่มวัดความหนาของตัวอย่างฟิล์มฟิล์มชิ้นละ 5 จุดที่แตกต่างกัน วัดฟิล์ม 3 ชิ้นต่อชุดการทดลอง หาค่าเฉลี่ยและรายงานผลในหน่วยมิลลิเมตร

3.4.3.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate; WVTR)

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มโดยวิธี Cup method ตามวิธีที่อธิบายโดย Caner *et al.* (1998) โดยตัดแปลงเล็กน้อย การวัดทำโดยนำตัวอย่างฟิล์มมาวางบนถ้วยอคูมิเนียมที่บรรจุน้ำกลั่น แล้วผนึกปากถ้วยด้วยฟิล์มพาราฟินให้แน่นหนาและไม่มีรอยรั่ว ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง วางตัวอย่างถ้วยทดสอบในโถดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $11 \pm 2 \%$ อุณหภูมิ 26 ± 2 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักถ้วยทดสอบทุกๆ 6 ชั่วโมง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง คำนวณ WVTR ($\text{g/h} \cdot \text{m}^2$) ตามสมการที่ 1 สำหรับ water vapor permeability coefficient (WVPC) คำนวณโดยนำค่า WVTR คูณด้วยความหนาของฟิล์มและหารด้วยความแตกต่างของความดันไอน้ำทั้งสองด้านของแผ่นฟิล์มดังสมการที่ 2

$$\text{WVTR} = \text{Slope} / \text{Film Area} \quad (1)$$

$$\text{WVPC} = \text{WVTR} \times \text{thickness} / \Delta \text{Vapor pressure} \quad (2)$$

3.4.3.3 แรงต้านทานการฉีกขาดและการยืดตัวก่อนขาด (Tensile strength and Elongation at break)

การวิเคราะห์แรงต้านทานการฉีกขาดและร้อยละการยืดตัวก่อนขาดทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-12 (Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron model 1123) ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างปากจับ 50 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการดึง 25 มิลลิเมตรต่อนาที ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 2\%$ จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ 5 ชิ้นต่อตัวอย่าง ค่าแรงต้านทานการฉีกขาดรายงานในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) และการยืดตัวของฟิล์มในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%)

3.4.3.4 การละลายน้ำของฟิล์ม (water solubility)

สมบัติการละลายน้ำของฟิล์มทำโดยตัดฟิล์มให้มีขนาดกว้างและยาว 3×3 เซนติเมตร วางฟิล์มที่จะทดสอบใน petri dish ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทิ้งให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบฟิล์มตัวอย่างละ 4 ชิ้น ชั่งน้ำหนักของฟิล์ม

ก่อนและหลังแช่น้ำด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของฟิล์ม และหาค่าเฉลี่ย ดังสมการ

$$\text{การละลายน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3)$$

3.4.3.5 การทดสอบทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มอินดิเคเตอร์ที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเก่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5800LV: JEOL, Japan) ทำการศึกษาพื้นผิวและหน้าตัดขวางของฟิล์ม สำหรับการศึกษารายละเอียดของฟิล์มทำการเตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มให้มีขนาดกว้าง 0.8 มิลลิเมตร และยาว 8 เซนติเมตร จุ่มตัวอย่างฟิล์มในไนโตรเจนเหลวและหักฟิล์มโดยใช้ใบมีด สำหรับการศึกษารายละเอียดของฟิล์มจะเตรียมตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาดกว้างและยาว 0.8 x 0.8 มิลลิเมตร ตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมแล้วนำไปเคลือบทองด้วยเครื่องเครื่อง ion sputter coater (SC 7620: Polaron Range, UK) ยึดติดตัวอย่างบน aluminum stub ด้วยเทปคาร์บอน วิเคราะห์ตัวอย่างที่ 10 kV ที่กำลังขยาย 200 และ 1,500 เท่า

3.4.2 การศึกษาสัดส่วนของแอนโทไซยานินที่เหมาะสมและการทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์ม

3.4.2.1 การสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเก่า

การเตรียมตัวอย่างข้าวเก่าทำโดยนำตัวอย่างข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นบางส่วนจากข้าวและเพื่อทำลายแมลงและไข่แมลงที่อาจติดมากับวัตถุดิบ จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องปั่นผสมอาหาร เก็บรักษาในถุงซิปล็อคชนิดอะลูมิเนียมฟอยล์ในโถดูดความชื้นที่บรรจุซิลิกาเจลไว้ในจนกว่าจะนำมาสกัด

กระบวนการสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเก่าทำตามกรรมวิธีของ Pedro *et al* (2016) โดยนำตัวอย่างข้าวที่บดละเอียดเติมในสารละลายของเอทานอลและกรดซิตรีคความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร (80:20) ในอัตราส่วนข้าวและสารสกัดเป็น 1:10 ทำการสกัดด้วยเครื่องเขย่าสารอัตโนมัติเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราความเร็วรอบในการสกัดคงที่ แยกเศษที่ข้าวที่เหลือจากการสกัดออกด้วยกระชอนตาถี่ และกรองสารสกัดอีกครั้งด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และกรองซ้ำอีก

ครั้ง (รูปที่ 3.5 A-C) กระบวนการสกัดทำในสภาวะที่ปกป้องจากแสงโดยใช้อะลูมิเนียมฟอยล์ห่อหุ้ม อุปกรณ์สกัดไว้ และกระทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3.4.2.2 การศึกษาสัดส่วนของแอนโทไซยานินที่เหมาะสม

ศึกษาระดับของแอนโทไซยานินที่เหมาะสม 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30% จาก ปริมาตรรวมของส่วนประกอบทั้งหมด फिल्मที่เตรียมได้นำมาทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์ม

3.4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์ม

ทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์มในสารละลายฟอสเฟต บัฟเฟอร์ (เตรียมโดยใช้ 1% โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และ 1% ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต) ที่ปรับพีเอชด้วยกรดกรดแลคติก (0.2 โมลาร์) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.1 นอร์มอล) ให้ได้ สารละลายมาตรฐานพีเอชที่มีค่า 1-12 นำตัวอย่างฟิล์มที่มีขนาดกว้างและยาว 2x2 เซนติเมตร จุ่มลงในถ้วยพลาสติกสีขาวที่มีสารละลายพีเอชมาตรฐานเป็นเวลา 10 นาที สังเกตการเปลี่ยนสีของฟิล์มในช่วงค่าพีเอช 1-12 และวัดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี

3.4.2.4 การวัดสี

การวัดสีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มโดยใช้เครื่องวัดสี (Color Quest XE; Hunter Lab, USA) วัดค่าสีทั้งในระบบ CIE Lab และ CIE Lch รายงานผลเป็นค่า L^* a^* b^* Chroma และ Hue โดยมีความหมายดังนี้

L^* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100 ค่าที่เป็น 0 แสดงถึงความมืด และ 100 แสดงถึงความสว่าง

a^* คือ ค่าความเป็นสีแดงและเขียว โดยถ้ามีค่าเป็น + จะมีทิศทางเป็นสีแดง และมีค่าเป็น - จะมีทิศทางเป็นสีเขียว

b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลืองและน้ำเงิน โดยถ้ามีค่าเป็น + จะมีทิศทางเป็นสีเหลือง และมีค่าเป็น - จะมีทิศทางเป็นสีน้ำเงิน

Chroma (C^*) หมายถึง ความเข้มสี มีค่าตั้งแต่ 0-100 ใช้แสดงความแตกต่างของความเข้มของสีในเฉดสีเดียวกัน

Hue (h) เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีในกราฟ มีหน่วยเป็นองศา (°) ช่วงของ Hue angle แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงช่วงของ Hue angle ในระบบ CIE Lch

สี	ช่วงของ Hue angle
แดง	346°-40°
ส้ม	40°-72°
เหลือง	72°-105°
เหลือง-เขียว	105°-130°
เขียว	166°-220°
เขียว-น้ำเงิน	220°-275°
น้ำเงิน	275°-346°
ม่วง	275°-346°

ที่มา: Jonauskaitė *et al.* (2016)

ความแตกต่างของสีทั้งหมดรายงานโดยค่า ΔE โดยเปรียบเทียบสีของฟิล์มที่พีเอชต่างๆ เทียบกับฟิล์มก่อนทำการทดลองเป็นมาตรฐาน (L_0, a_0 and b_0)

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (4)$$

3.4.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มในตัวอย่างอาหาร

ทำการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มในตัวอย่างอาหาร ได้แก่ ปลาหางแข็ง เนื้อสันในไก่ และสับปะรดหั่นชิ้น เพื่อดูการตอบสนองของฟิล์มอินดิเคเตอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร ในระหว่างการเก็บรักษาในสภาวะเร่ง (อุณหภูมิ 36 ± 2 องศาเซลเซียส) ตัวอย่างปลาหางแข็ง (น้ำหนัก 162 ± 5 กรัม/ตัว) และเนื้อสันในไก่ (น้ำหนัก 38 ± 3 กรัม/ชิ้น) จะนำมาบรรจุในกล่องพลาสติกใสที่มีฝาปิดสนิท (กว้าง 15 และยาว 17 เซนติเมตร) กล่องละ 1 ตัว/ชิ้น

สับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวีย เตรียมโดยการปอกเปลือก เอาแกนออก และหั่นแบ่งตามความยาวของผลให้ได้หกชิ้น แต่ละชิ้นนำมาหั่นเป็นชิ้นมีความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร

บรรจุในกล่องพลาสติกใสทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร) แต่ละกล่องมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 88-98 กรัม

ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฟิล์มสองรูปแบบคือ การทดสอบแบบสัมผัสกับอาหาร และการทดสอบแบบไม่สัมผัสกับอาหาร ในการทดสอบแบบสัมผัสกับอาหารจะวางตัวอย่างฟิล์ม (2 x 2 เซนติเมตร) ลงบนผิวของอาหาร และการทดสอบแบบไม่สัมผัสกับอาหาร จะนำตัวอย่างฟิล์มติดบนฝากล่องโดยใช้เทปกาวสองหน้า โดยติดฟิล์มจำนวน 3 ตำแหน่ง บนฝากล่องด้านใน (ซ้าย ขวา และกึ่งกลาง) สำหรับกล่องทรงสี่เหลี่ยม และสองตำแหน่ง (ซ้าย และขวา) สำหรับกล่องทรงกลม สังเกตการเปลี่ยนสีของฟิล์มเมื่อค่าพีเอชของอาหารเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษา

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ SPSS Ver. 26 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.6 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการความปลอดภัยของอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการศึกษาสูตรและสัดส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐาน

4.1.1 ฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานและเมทิลเซลลูโลส

ฟิล์มสูตรพื้นฐานที่เตรียมได้จากไคโตซาน (CH) ความเข้มข้น 1% ร่วมกับเมทิลเซลลูโลส (MC) 0.5, 1.0 และ 2.0% ผลการทดลองพบว่า การใช้เมทิลเซลลูโลสที่ระดับความเข้มข้นต่ำที่สุด คือ 0.5% ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยความเข้มข้นของเมทิลเซลลูโลสมีผลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของฟิล์ม (ตารางที่ 4.2) พบว่า การใช้เมทิลเซลลูโลส 1.5% ร่วมกับไคโตซาน ฟิล์มจะมีความแข็งแรงโดยสามารถลอกออกมาจากพิมพ์ได้อย่างง่ายและไม่ฉีกขาด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เมทิลเซลลูโลสที่ระดับความเข้มข้น 1% ซึ่งฟิล์มจะฉีกขาดง่าย (ตารางที่ 4.2) ดังนั้น ระดับความเข้มข้นของเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มสูตรพื้นฐานคือ 1.5%

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากไคโตซานร่วมกับเมทิลเซลลูโลส 0.5-1.5%

ทรีตเมนต์	ความหนา (mm)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (10^{-4} g/ m · h · atm)	การละลายน้ำ (%)
CH 1.0% + MC 0.5%	- *	- *	-*
CH 1.0% + MC 1.0%	0.058 ± 0.003 ^b	3.85 ± 0.003 ^b	46.49 ± 1.17 ^{ns}
CH 1.0% + MC 1.5%	0.060 ± 0.003 ^a	3.93 ± 0.021 ^a	47.25 ± 2.15 ^{ns}

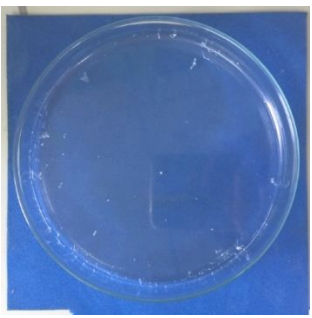

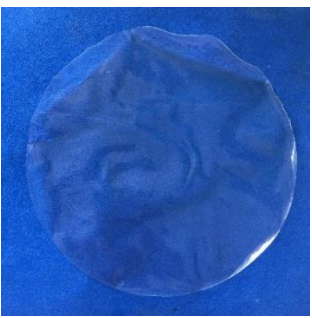
หมายเหตุ: ข้อมูลที่กำกับด้วย (*) คือไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้

: ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ฟิล์มที่เตรียมได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 นิ้ว ความหนาของฟิล์มจะมากขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของเมทิลเซลลูโลสสูงขึ้น โดยการเพิ่มระดับเมทิลเซลลูโลสเป็น 1.5% (1% CH : 1.5% MC) ส่งผลให้ฟิล์มมี

ความหนาเท่ากับ 0.060 มิลลิเมตร ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจากเมทิลเซลลูโลส 1% (1%CH : 1% MC) มีความหนาเท่ากับ 0.058 มิลลิเมตร อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่มีระดับเมทิลเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้นจะมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากด้วย (ตารางที่ 4.1) ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่เป็นไฮโดรฟิลิกของเมทิลเซลลูโลส

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลสสูตรต่างๆ

ฟิล์ม	สูตร	ลักษณะฟิล์ม
	ไคโตซาน 1% ร่วมกับ เมทิลเซลลูโลส 0.5%	สีใส ชุ่น ตัดแน่นกับพิมพ์ ไม่ สามารถลอกเป็นแผ่นได้
	ไคโตซาน 1% ร่วมกับ เมทิลเซลลูโลส 1%	เนื้อบาง นิ่ม เหนียว ยึดได้ เล็กน้อย ลอกออกได้ยาก ผิวเรียบ ไม่ย่น
	ไคโตซาน 1% ร่วมกับ เมทิลเซลลูโลส 1.5%	สีขาวใส ชุ่นเล็กน้อย เนื้อ หนา เหนียว ยึดได้เล็กน้อย ขาดยาก ลอกออกได้ง่าย ผิวเรียบ ไม่ย่น

เมทิลเซลลูโลสมีคุณสมบัติที่เป็นไฮโดรฟิลิกเนื่องจากโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จึงมีความสามารถในการต้านทานการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำ ดังนั้น ชุดทดลองที่เติมเมทิลเซลลูโลส 1.5% (1% CH : 1.5% MC) จึงมีความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าชุดทดลองที่เติมเมทิลเซลลูโลส 1% (1% CH : 1% MC) อย่างไรก็ตาม ข้อดีคือสามารถป้องกันการควบแน่นของไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ในบรรจุภัณฑ์อาหารได้ (Park and Chinnan, 1995) เปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของทั้งสองชุดทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีความอยู่ระหว่าง 46-47%

4.1.2 फिल्मที่เตรียมจากโคโตซานและพีวีเอ

ฟิล์มสูตรพื้นฐานที่เตรียมจากโคโตซาน 0.5, 1.0 และ 2.0% ร่วมกับพีวีเอ 1% พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของโคโตซาน 0.5% จะได้ฟิล์มที่ไม่แข็งแรงพอที่จะสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้ การเพิ่มระดับความเข้มข้นของโคโตซานให้สูงขึ้นเป็น 1 และ 2% จะส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งและความเหนียวและสามารถลอกออกจากพิมพ์ได้ง่ายโดยไม่ฉีกขาด (ตารางที่ 4.4) ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้โคโตซาน 1% ฟิล์มมีความบางมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากโคโตซาน 2% จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีความเหนียวและมีความหนามากขึ้น และสามารถลอกออกได้ง่าย

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากโคโตซาน 0.5-2% ร่วมกับพีวีเอ 1%

ทรีตเมนต์	ความหนา (mm)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ($10^{-4} \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{atm}$)	การละลายน้ำ (%)
CH 0.5% + PVA 1.0%	-*	-*	-*
CH 1.0% + PVA 1.0%	0.064 ± 0.003^b	4.3 ± 0.15^a	46.12 ± 2.47^a
CH 2.0% + PVA 1.0%	0.071 ± 0.004^a	4.0 ± 0.16^b	35.32 ± 0.11^b

หมายเหตุ: ข้อมูลที่กำกับด้วย (*) คือไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้

: ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

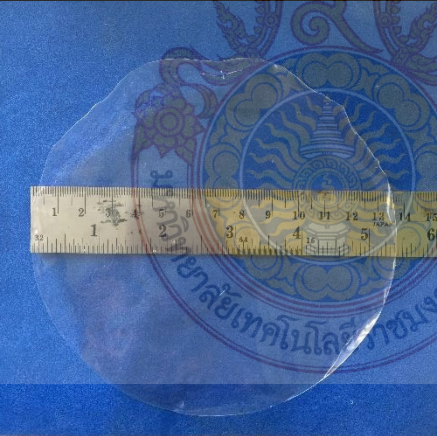
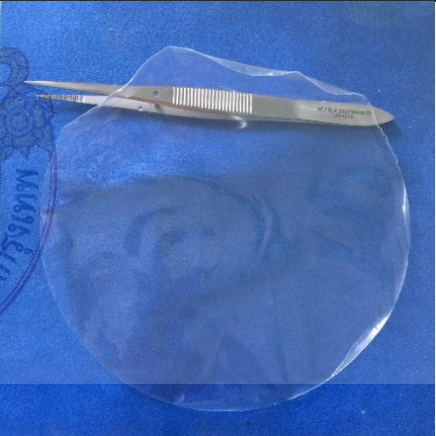


ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานและพีวีเอแสดงในตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ไคโตซานในปริมาณที่มากขึ้น (2% CH + 1% PVA) และมีการละลายน้ำของฟิล์มลดลงจาก 46.12 (1% CH + 1% PVA) เป็น 35.32% (2% CH + 1% PVA) ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติที่เป็น amorphous solid ของไคโตซาน และไม่ละลายน้ำ

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของฟิล์มไคโตซาน-พีวีเอสูตรต่างๆ

ฟิล์ม	สูตร	ลักษณะฟิล์ม
	ไคโตซาน 0.5% ร่วมกับ พีวีเอ 1.0%	สีใส ไม่ขุ่น บาง ติดแน่นกับ พิมพ์ ไม่สามารถลอกเป็น แผ่นได้
	ไคโตซาน 1% ร่วมกับ พีวีเอ 1%	สีใส ไม่ขุ่น เนื้อบาง ขาดยาก ไม่ค่อยยืด
	ไคโตซาน 2% ร่วมกับ พีวีเอ 1%	สีใส ไม่ขุ่น เนื้อหนา เหนียว ขาดยาก ไม่ค่อยยืด

ฟิล์มจากไคโตซานจะมีความแข็งแรง (rigid) เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระในโมเลกุล (Abraham et al., 2016) อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงในชุดทดลอง 2% CH + 1% PVA ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติของไคโตซานที่ไม่ละลายน้ำ (Abraham et al., 2016) นอกจากนี้ฟิล์มคอมโพสิตไคโตซาน+พีวีเอ ยังมีความสามารถในการพองตัวในน้ำเนื่องมาจากการมีสมบัติเป็นไฮโดรเจล (hydrogel) เมื่ออยู่ในน้ำ มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ในโครงสร้างได้ โดยความสามารถในการพองตัวในน้ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของพีวีเอในส่วนผสมมากขึ้น Casey and Wilson (2015) รายงานว่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวของฟิล์มไคโตซานพีวีเอในสัดส่วน 50:50 และ 25:75 เพิ่มขึ้น 25% และ 60% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมพีวีเอ

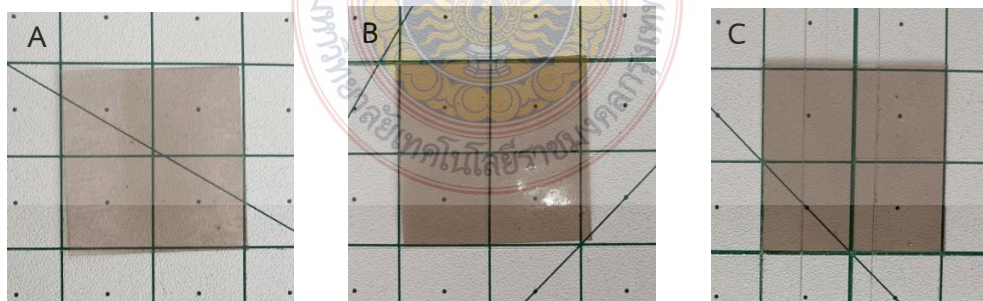
ตารางที่ 4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์มและเปรียบเทียบความใสและความขุ่นของฟิล์มสองสูตร

สูตร	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความใส
1% CH+1.5% MC		
2% CH+1% PVA		

ขนาดและความใสของฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลส และไคโตซาน-พีวีเอ แสดงตารางที่ 4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์มที่เตรียมได้มีขนาด 5.5 นิ้ว ฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซาน-พีวีเอจะมีความใสของฟิล์มมากกว่าสูตรที่เตรียมจากไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลส มีความโปร่งใส (transparent) ของฟิล์มมากกว่า โดยสามารถมองเห็นทะลุผ่านและเห็นวัตถุได้ชัดเจนกว่า ในขณะที่ฟิล์มสูตรไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลสมีความโปร่งใสน้อยกว่า ฟิล์มทั้งสองสูตรมีความเหนียวโดยไม่สามารถถูกทำให้ฉีกขาดได้ด้วยมือ แต่ฟิล์มสูตรไคโตซาน-เมทิลเซลลูโลสจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าไคโตซาน-พีวีเอ

4.2 การศึกษาสัดส่วนของแอนโทไซยานินที่เหมาะสมและการทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ของฟิล์ม

จากการทดลองที่ 4.1 จะเลือกฟิล์มสูตรมาตรฐานที่เตรียมจากเมทิลเซลลูโลส 1.5% และไคโตซาน 1% มาใช้เป็นฟิล์มต้นแบบสำหรับพีเอชอินดิเคเตอร์ เนื่องจากฟิล์มมีลักษณะที่เหนียว มีความยืดหยุ่นกว่าฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานและพีวีเอ และสามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยจะนำมาเติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวก่ำในปริมาณ 10-30% ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล และทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นอินดิเคเตอร์ในสารละลายพีเอชมาตรฐาน



รูปที่ 4.1 ฟิล์มไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลส ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวก่ำในปริมาณ 10 (A) 20 (B) และ 30% (C)

4.2.1 สัดส่วนของแอนโทไซยานินต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าการเติมแอนโทไซยานินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความหนามากขึ้นด้วย โดยฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานิน

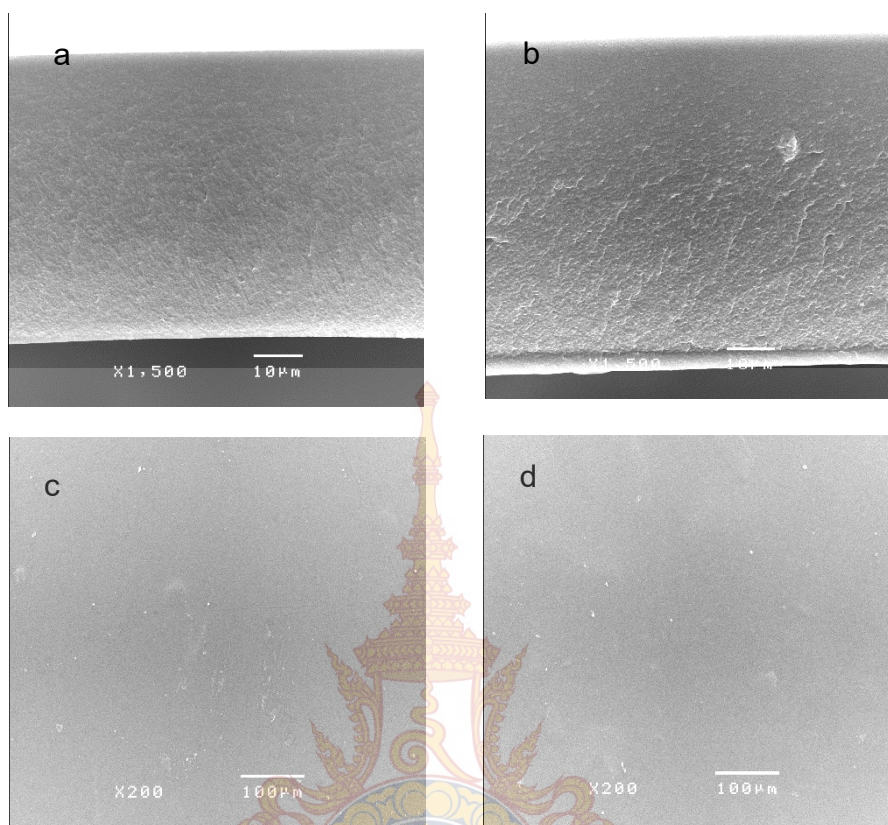
10% มีความหนา 0.0615 มิลลิเมตร และความหนาจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.0646 และ 0.0716 มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อเติมแอนโทไซยานิน 20 และ 30% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากเมทิลเซลลูโลส (1.5%) และโคโคซาน (1%) ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30%

สารสกัดข้าวกล้า (%)	ความหนา (mm)	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (10^{-4} g/ m ·h· atm)
0	0.0580 ± 0.0030 ^d	3.93 ± 0.021 ^a
10	0.0615 ± 0.0014 ^c	3.34 ± 0.012 ^b
20	0.0646 ± 0.0026 ^b	3.02 ± 0.082 ^c
30	0.0716 ± 0.0013 ^a	2.84 ± 0.022 ^d

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของไอน้ำผ่านเมทริกซ์ของฟิล์ม การเติมแอนโทไซยานินทุกระดับความเข้มข้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม ($2.84-3.34 \times 10^{-4}$ g/ m ·h· atm) มีค่าน้อยกว่าฟิล์มสูตรมาตรฐาน (3.93×10^{-4} g/ m ·h· atm) ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มลดลง (ตารางที่ 4.6) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคของแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสารประกอบโพลีฟีนอลที่ยึดเหนี่ยวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอน้ำผ่านฟิล์มได้ ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าภาพตัดขวางของฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินในปริมาณ 30% จะมีลักษณะที่หยาบ (รูป 4.2 b) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตรมาตรฐานที่มีลักษณะเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ต่อเนื่องและสม่ำเสมอไปทั่วแผ่น (รูป 4.2 a) และฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานิน 30% มีความหนามากกว่าสูตรมาตรฐานอย่างเห็นได้ชัดเมื่อสังเกตที่กำลังขยายเดียวกัน (1,500 เท่า) แต่ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มสูตรมาตรฐานและสูตรที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานินมีความเรียบเนียนไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.2 c และ d)



รูปที่ 4.2 รูปแสดงหน้าตัดขวาง (a และ b) ที่กำลังขยาย 1,500x และพื้นผิวที่กำลังขยาย 200x (c และ d) ของฟิล์มสูตรมาตรฐานที่เตรียมจากเมทิลเซลลูโลสและไคโตซาน (a และ c) เปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้าในปริมาณ 30% (b และ d)

ค่าแรงต้านทานการดึงขาด (Tensile Strength) มีเปอร์เซ็นต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมปริมาณสารสกัดจากข้าวกล้าเพิ่มขึ้น และมีค่าร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (Elongation at break) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตรมาตรฐานที่ไม่ได้เติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า (ตารางที่ 4.7) โดยฟิล์มไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลส ที่เติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวกล้าในปริมาณ 30% มีค่าแรงต้านทานการดึงขาดสูงที่สุดคือ 20.3 MPa และค่าร้อยละการยืดตัวก่อนขาดน้อยที่สุดคือ 63.2%

ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรพื้นฐานจากเมทิลเซลลูโลส (1.5%) และไคโตซาน (1%) ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30%

สารสกัดข้าวกล้า (%)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	17.8 ± 0.11 ^d	69.4 ± 1.32 ^a
10	18.2 ± 0.22 ^c	67.7 ± 1.33 ^b
20	19.8 ± 0.34 ^b	65.9 ± 1.23 ^c
30	20.3 ± 0.23 ^a	63.2 ± 1.42 ^d

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเคเตอร์ฟิล์มในสารละลายพีเอชมาตรฐาน

การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส/ไคโตซาน ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า จะทำการศึกษาในตัวอย่างฟิล์มแอนโทไซยานิน 30% เนื่องจากฟิล์มมีสีของแอนโทไซยานินที่ชัดเจน และสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีที่สังเกตได้ด้วยสายตา โดยผลการทดสอบในสารละลายพีเอชมาตรฐาน 1.0-12.0 แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าอินดิเคเตอร์ฟิล์มตอบสนองในเชิงบวกต่อสารละลายพีเอชมาตรฐานทุกระดับ โดยที่พีเอช 1.0 ฟิล์มอินดิเคเตอร์แสดงสีชมพู-แดง ที่พีเอช 2-4 อินดิเคเตอร์ฟิล์มแสดงสีชมพูอ่อน พีเอช 5-6 แสดงสี น้ำตาลอมชมพู ซึ่งมีสีใกล้เคียงกับสีเริ่มต้นของฟิล์ม พีเอช 7-9 แสดงสี น้ำตาลอมเขียว พีเอช 10 แสดงสี เหลืองอมเขียว และที่สภาวะเป็นเบส (พีเอช 11.0-12.0) ฟิล์มอินดิเคเตอร์แสดงสีในช่วงสีเหลือง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มอินดิเคเตอร์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของอาหารได้

ค่าสี L^* a^* b^* Chroma และ hue ของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 30% เมื่อทดสอบในสารละลายพีเอชมาตรฐาน 2-12 แสดงในตารางที่ 3 ผลการทดลอง พบว่าอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่พีเอช 2 และ 3 แสดงค่าความเป็นสี (Hue angle) อยู่ในช่วง $21.78-24.12^\circ$ คือ ช่วงสีแดง ซึ่งสอดคล้องกับสีที่ปรากฏในรูปที่ 4.3 เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น 4-5 ค่า Hue angle เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง $42.37-44.66$ ซึ่งแสดงว่าฟิล์มมีสีชมพูอมส้ม โดยมีความเข้มของสีไม่มากนัก

ซึ่งสังเกตได้จากค่า Chroma (2.88-3.29) เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6-7 ค่า Hue angle เพิ่มขึ้นเป็น 59.77-60.85 และค่า Hue angle มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 8-10 เป็น 63.39-65.62 และมีค่า L^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่อยู่ในค่าพีเอชที่เป็นกรด (pH 2-4) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความเป็นสีส้มอมเหลืองเพิ่มมากขึ้น และมีค่าความสว่างลดลง โดยฟิล์มจะปรากฏเป็นสีเหลืองชัดเจนเมื่ออยู่ในสภาวะเบส (พีเอช 11-12) โดยมีค่า Hue angle เพิ่มขึ้นเป็น 69.21 และ 75.68 ตามลำดับ โดยฟิล์มที่อยู่ในสารละลายพีเอช 12 จะแสดงความเข้มของสีเหลืองชัดเจนกว่าที่ค่าพีเอช 11 โดยมีค่า Chroma เท่ากับ 14.53 และสอดคล้องกับค่า b^* ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีเหลือง ซึ่งมีค่าสูงที่สุดคือ 14.07



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของฟิล์มไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลส ที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวดำ ที่ค่าพีเอช 1-12 ในสารละลายพีเอชมาตรฐาน โดยแถวที่ 1-3 จากซ้ายไปขวาแสดงดังนี้

(1) pH 1 2 3 และ 4 (2) pH 5 6 7 และ 8 (3) pH 9 10 11 และ 12

ตารางที่ 4.8 ค่าสี L* a* b* Chroma Hue angle และ ΔE ของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 30% ที่ทดสอบในสารละลายพีเอชมาตรฐาน 1-12

pH	L*	a*	b*	Chroma	Hue angle	ΔE
1	76.48 ± 0.16 ^d	7.88 ± 0.99 ^a	0.40 ± 0.04 ^l	7.42 ± 0.22 ^e	19.78 ± 0.17 ^k	5.18
2	77.92 ± 0.04 ^a	4.11 ± 0.01 ^b	0.69 ± 0.02 ^k	6.86 ± 0.00 ^f	21.78 ± 0.48 ^j	4.10
3	71.00 ± 0.02 ^f	3.31 ± 0.10 ^e	0.74 ± 0.01 ^j	6.38 ± 0.01 ^h	24.12 ± 0.04 ⁱ	3.64
4	76.81 ± 0.01 ^b	2.81 ± 0.00 ^g	2.03 ± 0.01 ⁱ	2.88 ± 0.01 ^k	44.66 ± 0.21 ^g	2.75
5	76.75 ± 0.01 ^c	3.78 ± 0.01 ^d	2.22 ± 0.02 ^h	3.29 ± 0.01 ^j	42.37 ± 0.25 ^h	2.54
6	72.79 ± 0.01 ^e	3.23 ± 0.01 ^f	5.79 ± 0.02 ^f	6.63 ± 0.01 ^g	60.85 ± 0.13 ^e	3.70
7	69.52 ± 0.01 ⁱ	4.00 ± 0.00 ^c	6.87 ± 0.02 ^d	7.95 ± 0.02 ^b	59.77 ± 0.10 ^f	6.50
8	70.81 ± 0.01 ^g	2.58 ± 0.02 ⁱ	5.28 ± 0.04 ^g	5.88 ± 0.03 ⁱ	63.96 ± 0.23 ^d	4.59
9	69.22 ± 0.05 ^j	3.20 ± 0.02 ^f	6.98 ± 0.01 ^c	7.69 ± 0.01 ^c	65.37 ± 0.18 ^c	6.80
10	69.69 ± 0.01 ^h	2.75 ± 0.01 ^{gh}	6.06 ± 0.01 ^e	6.65 ± 0.01 ^g	65.62 ± 0.09 ^c	5.89
11	68.63 ± 0.01 ^k	2.70 ± 0.02 ^h	7.11 ± 0.03 ^b	7.61 ± 0.02 ^d	69.21 ± 0.22 ^b	7.37
12	64.42 ± 0.01 ^l	3.60 ± 0.01 ^d	14.07 ± 0.04 ^a	14.53 ± 0.03 ^a	75.68 ± 0.07 ^a	15.24

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเคเตอร์ฟิล์มในตัวอย่างอาหาร

4.2.3.1 ปลาหางแข็ง

การเปลี่ยนสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์สัมพันธ์กับคุณภาพความสดของปลา การทดสอบทั้งในสภาวะสัมผัสและไม่สัมผัสกับอาหาร พบว่า ฟิล์มมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช โดยเมื่อปลาเริ่มเสื่อมคุณภาพฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอมชมพูใส (รูปที่ 4.3) กลายเป็นสีน้ำตาลเข้มอมส้มที่ทึบแสงขึ้น (รูปที่ 4.1) มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้นคือ 5.46 ± 0.01 เป็น 5.92 ± 0.02 เมื่อมีการเน่าเสียในวันที่ 2 ของการเก็บรักษาในสภาวะเร่ง ($36 \pm 2^{\circ}\text{C}$) เนื้อปลามีกลิ่นเหม็นเน่าและตาปลามีลักษณะขุ่น การเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์เกิดขึ้นเนื่องจากระดับของ total volatile base nitrogen (TVBN) ซึ่งเป็นปริมาณสารที่ระเหยรวมได้ทั้งหมดภายในกล้ามเนื้อสัตว์น้ำที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเน่าเสียเกิดขึ้น โดยอาจเกิดจากเอนไซม์ในตัวผลิตภัณฑ์เองหรือจากจุลินทรีย์ ซึ่งใช้เป็นดัชนีในการจัดแบ่งคุณภาพความสดของผลิตภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ประมง

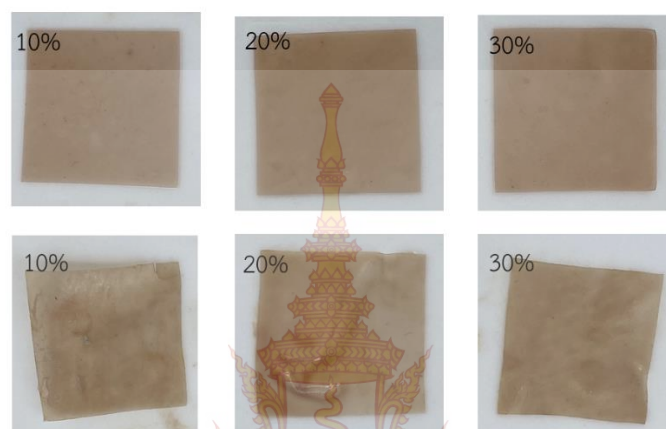
4.2.3.2 สันในไก่

การเน่าเสียของเนื้อไก่เกิดเนื่องมาจากแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนในเนื้อไก่ทำให้โมเลกุลของโปรตีนมีขนาดเล็กลงและกรดอะมิโน ซึ่งจะถูกละลายต่อไปได้สารระเหยที่มีกลิ่นเหม็น เช่น แอมโมเนีย ส่งผลให้ค่าพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพีเอชเริ่มต้นเฉลี่ยของเนื้อสันในไก่มีค่าเท่ากับ 5.19 ± 0.01 และเมื่อเกิดการเน่าเสียในวันที่ 2 ของการเก็บรักษาในสภาวะเร่ง ($36 \pm 2^{\circ}\text{C}$) ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 5.76 ± 0.01 เนื้อไก่อมีกลิ่นเหม็นเน่าและมีสีซีดลงจากสีชมพูสดในวันเริ่มต้น โดยการทดสอบทั้งในสภาวะที่สัมผัสที่สัมผัสและไม่สัมผัสกับอาหาร ฟิล์มมีการเปลี่ยนสีไปในทิศทางคล้ายกันคือมีสีน้ำตาลเข้มอมเทาในการทดสอบในสภาวะสัมผัสกับอาหาร และมีสีน้ำตาลเข้มในสภาวะที่ไม่สัมผัสกับอาหาร (รูปที่ 4.5)

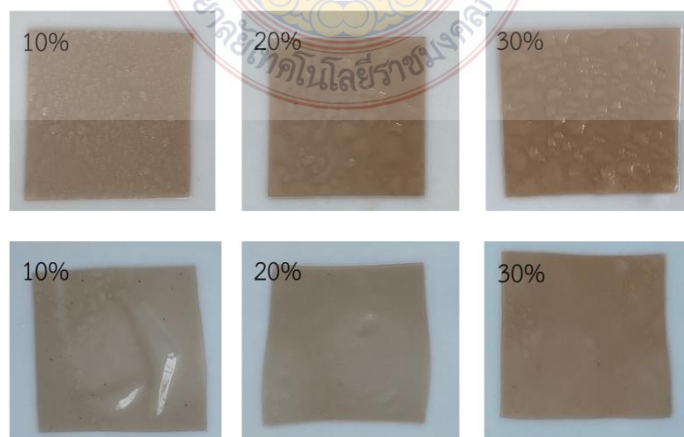
4.4.3.3 สับประรดหั่นชิ้น

การเก็บรักษาสับประรดหั่นชิ้นในสภาวะเร่ง ($36 \pm 2^{\circ}\text{C}$) ส่งผลให้ค่าพีเอชของสับประรดลดลงจากวันเริ่มต้นคือ 4.35 ± 0.07 เป็น 3.88 ± 0.01 ภายหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 2 วัน โดยฟิล์มมีการตอบสนองของสีเปลี่ยนไปมีสีส้มอ่อน (รูปที่ 4.6) เมื่อเปรียบเทียบกับวันเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบในสภาวะ

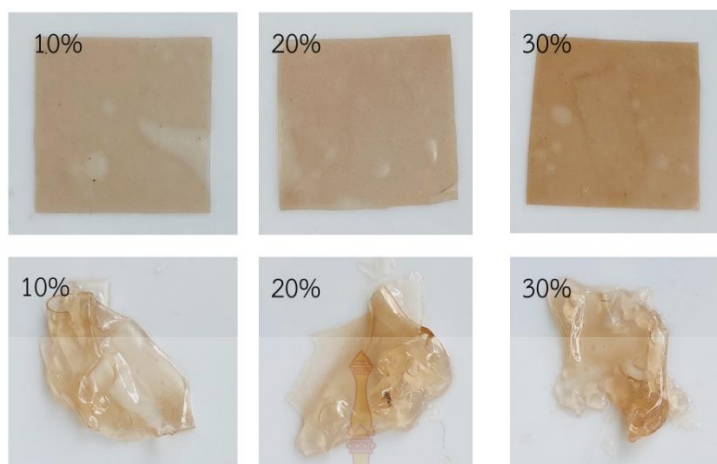
ที่สัมผัสฟิล์มกับอาหารจะส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะเปื่อยยุ่ยเมื่อค่าพีเอชลดต่ำลงมาก ทั้งนี้สีของฟิล์มในการทดสอบทั้งสองสภาวะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน การลดลงของค่าพีเอชในสัปดาห์แรกเกี่ยวข้องกับการเจริญของจุลินทรีย์ที่สามารถใช้น้ำตาลในผลิตภัณฑ์เป็นแหล่งอาหารในการเจริญเติบโตและผลิตกรดขึ้นส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง



รูปที่ 4.4 สีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30% เมื่อปลาหางแข็งเกิดการเน่าเสีย เมื่อทดสอบโดยไม่สัมผัส (แถวบน) และสัมผัสกับอาหาร (แถวล่าง)



รูปที่ 4.5 สีของอินดิเคเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวกล้า 10-30% เมื่อเนื้อสันในไก่เกิดการเน่าเสีย เมื่อทดสอบโดยไม่สัมผัส (แถวบน) และสัมผัสกับอาหาร (แถวล่าง)



รูปที่ 4.6 สีของอินดิเตอร์ฟิล์มที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวดำ 10-30% เมื่อสับประตื้นขึ้นเกิดการ
เน่าเสีย เมื่อทดสอบโดยไม่สัมผัส (แถวบน) และสัมผัสกับอาหาร (แถวล่าง)



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ฟิล์มสูตรมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเป็นพีเอชอินดิเคเตอร์ฟิล์มคือ โคลโตซาน 1% ร่วมกับเมทิลเซลลูโลส 1.5% และใช้โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG 400) เป็นพลาสติกไทเซอร์ โดยการเติมสารสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวก่ำในปริมาณ 30% ลงในส่วนผสมของฟิล์มที่ทำจากโคลโตซาน/เมทิลเซลลูโลส พบว่า ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และมีความยืดหยุ่นลดลง และสีของฟิล์มมีสีที่ชัดเจนเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์ โดยมีสีอยู่ในช่วงสีแดงเมื่ออยู่ในสภาวะกรด (pH 1.0-3.0) และสีเหลืองเมื่ออยู่ในสภาวะเบส (pH 11.0-12.0) การนำฟิล์มที่พัฒนาได้มาทดสอบการบ่งชี้การเสื่อมเสียหรือการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารในระหว่างการเก็บรักษาโดยใช้ค่าพีเอชเป็นตัวบ่งชี้ พบว่า ฟิล์มสามารถตอบสนองต่อการเสื่อมเสียของปลาแห้งและสันในไก่ ที่เก็บรักษาในกล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิทในสภาวะเร่ง (อุณหภูมิ 36 ± 2 องศาเซลเซียส) และสามารถใช้บ่งชี้ปริมาณกรดที่เพิ่มขึ้นของสัปปะรดกล้วยแห้งขึ้นพร้อมบริโภคน้ำในระหว่างการเก็บรักษาได้ โดยฟิล์มแสดงความสามารถในการตอบสนองและมีการเปลี่ยนสีเมื่ออาหารมีคุณภาพเปลี่ยนแปลงไปทั้งการทดสอบโดยใช้ฟิล์มสัมผัสกับอาหารโดยตรงและไม่สัมผัสกับอาหาร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในอนาคตควรมีการศึกษาชนิดของแอนโทไซยานินจากแหล่งธรรมชาติอื่นๆ เช่น มันม่วง และกะหล่ำปลีสีม่วง ที่มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชสำหรับอาหาร
2. จากการศึกษาพบว่าฟิล์มสามารถตอบสนองและมีการเปลี่ยนสีเมื่ออาหารมีคุณภาพเปลี่ยนแปลงไปโดยไม่ต้องสัมผัสกับอาหาร ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปศึกษาต่อยอดในการใช้เป็นอินดิเคเตอร์บ่งชี้การเสื่อมเสียของเนื้อสัตว์และอาหารทะเล รวมทั้งมีการศึกษาความแม่นยำในการตรวจวัดของฟิล์มอินดิเคเตอร์เพิ่มเติม

บรรณานุกรม

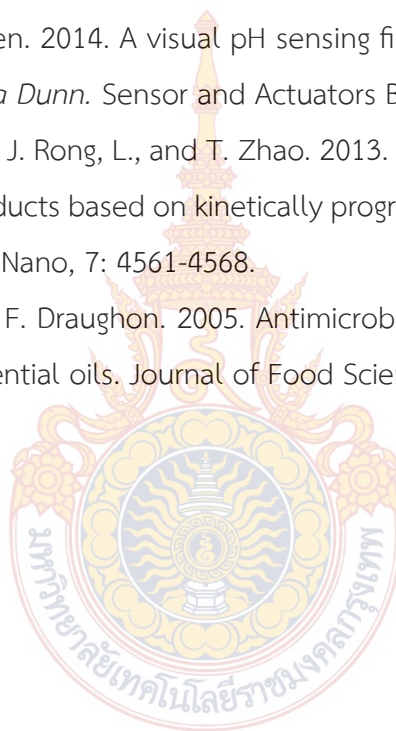
- นิธิยา รัตนานนท์. 2549. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 222.
- ดารณี ชันเพ็ชร และ ปิยะนุช รสเครือ. 2557. การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พี วี เอ)/โซเดียมคาร์บอกซี เมทิล เซลลูโลส (โซเดียม-ซี เอ็ม ซี) สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ, การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6 วันที่ 20 – 21 มีนาคม พ.ศ. 2557.
- ปิยวรรณ ปนิทานเต. 2553. “ฉลากอัจฉริยะ บอกลักษณะผลิตภัณฑ์” ใน MTEC เทคโนโลยีวัสดุ (เมษายน – มิถุนายน). ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. หน้า 37-42.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงษ์ และนิธิยา รัตนานนท์ . 2561. Anthocyanin/แอนโทไซยานิน. ออนไลน์ <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1103/anthocyanin> (เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2561)
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงษ์ และนิธิยา รัตนานนท์ . 2563. การเสื่อมเสียของอาหาร. ออนไลน์ <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1232/food-spoilage-> (เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2563)
- เพ็ญพิชญา เตียว. 2555. วิจัยข้าวก่ำดอยสะเก็ด พัฒนาสู่อาหารสุขภาพผู้ป่วยฯ. ออนไลน์ <https://www.thairath.co.th/content/305278> (เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2563)
- สุกิจ ปัญญาชัยเสนะ. 2542. การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของโคโตแซนและเมทิลเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2559. แนวโน้มการเติบโตของตลาดบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว. ออนไลน์ <https://functionalmat.wordpress.com/2015/10/08/> (เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2561)
- หน่วยวิจัยข้าวก่ำ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2555. ข้าวก่ำไทย – อาหารเสริมเพื่อสุขภาพ. ออนไลน์ http://web.agri.cmu.ac.th/prru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&cid=215:2011-07-30-04-09-32&id=519:2012-08-21-10-17-21&Itemid=57 (เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2561)
- Abraham, A., P. A. Soloman, and V.O. Rejini. 2016 Preparation of Chitosan-Polyvinyl Alcohol Blends and Studies on Thermal and Mechanical Properties. *Procedia Technology*, 24: 741-748.

- Brady, J., T. Dürig, P. I. Lee, and J.-X. Li. 2017. Polymer Properties and Characterization. Developing Solid Oral Dosage Forms, 181–223.
- Caner, C., P. J. Vergano, and J. L. Wiles. 1998. Chitosan film mechanical and permeation properties as affected by acid, plasticizer, and storage. *Journal of Food Science*, 63: 1049-1053.
- Casey, L. S., and L. D. Wilson. 2015. Investigation of chitosan-PVA composite films and their adsorption properties. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3: 78-84.
- Cervera, M. F., M. Karjalainen, S. Airaksinen, J. Rantanen, K. Krogars, J. Heinamaki, A. I. Colarte, and J. Yliruusi. 2004. Physical stability and moisture sorption of aqueous chitosan-amylose starch films plasticized with polyols. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 58: 69-76.
- Choi, D. Y., S.W. Jung, D. S. Lee, and S. J. Lee. 2014. Fabrication and characteristics of microbial time temperature indicators from bio-paste using screen printing method. *Packaging Technology and Science*, 27: 303-312.
- Choi, I., J. Y. Lee, M. Lacroix, and J. Han. 2017. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. *Food Chemistry*, 218: 122–128.
- Deb, P. K., S. F. Kokaz, S. N. Abed, A. Paradkar, and R. K. Tekade. 2019. Pharmaceutical and biomedical applications of polymers. *Basic Fundamentals of Drug Delivery*, 203–267.
- DeMerlis, C. C., and D. R. Schoneker. 2003. Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA). *Food Chem Toxicology Journal*, 41: 319–326.
- Flieger, M., M. Kantorova, A. Prell, T. Rezanka and J. Votruba. 2003. Biodegradable plastics from renewable sources. *Folia Microbiologica Journal*, 48(1): 27–44.
- Ghaani, M., C. A. Cozzolino, G. Castelli, and S. Farris. 2016. An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51: 1-11.

- Goldberg, S., R. Doyle, and M. Rosenberg. 1990. Mechanism of enhancement of microbial cell hydrophobicity by cationic polymers. *The Journal of Bacteriology*, 172: 5650-5654.
- Jayasekara, R., I. Harding, I. Bowater, G. B. Y. Christie, and G. T. Lonergan. 2004. Preparation, surface modification and characterisation of solution cast starch PVA blended films. *Polymer Testing Journal*, 23: 17–27.
- Kang, Y., J.-W. Kang, J.-H. Choi, S. Park, A. T. M. M. Rahman, and S. Jung. 2014. A feasibility study of application of laccase-based time-temperature indicator to kimchi quality control on fermentation process. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57: 819-825.
- Karki, S., H. Kim, S.-J. Na, D. Shin, K. Jo, and J. Lee. 2016. Thin films as an emerging platform for drug delivery. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 11(5): 559-574.
- Liu, B., H. Xu, H. Zhao, W. Liu, L. Zhao, and Y. Li. 2017. Preparation and characterization of intelligent starch/PVA films for simultaneous colorimetric indication and antimicrobial activity for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers*, 157: 842-849.
- Lu, L., W. Zheng, Z. Lv, and Y. Tang. 2013. Development and application of time-temperature indicators used on food during the cold chain logistics. *Packaging Technology and Science*, 26: 80-90.
- Luchese, L. C., N. Sperotto, J. Corralo, S. Isabel, and C. Tessaro. 2017. Effect of blueberry agro-industrial waste addition to corn starch-based films for the production of a pH-indicator film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104: 11-18.
- Ma, Q., L. Du, and L. Wang. 2017. Tara gum/polyvinyl alcohol-based colorimetric NH₃ indicator films incorporating curcumin for intelligent packaging.
- Maciel, V. B. V., C. M. P. Yoshida, and T. T. Franco. 2015. Chitosan/pectin polyelectrolyte complex as a pH indicator. *Carbohydrate Polymers*, 132: 537-545.
- Nopwinyuwong, A., T. Kitaoka, W. Boonsupthip, C. Pechyen, and P. Suppakul. 2014. Effect of cationic surfactants on characteristics and colorimetric behavior of

- polydiacetylene/silica nanocomposite as time-temperature indicator. *Applied Surface Science*, 314: 426-432.
- Park, H. J., and M. S. Chinnan. 1995. Gas and water vapor barrier properties of edible films from protein and cellulosic materials. *Journal of Food Engineering*, 25: 497-507.
- Park, S. Y., K. S. Marsh, and J. W. Rhim. 2002. Characteristics of different molecular weight chitosan films affected by the type of organic solvents. *Journal of Food Science*, 67(1): 194-197.
- Pereira, V. A., V. Aniceto, D. Arruda, I. N. Queiroz, and S. Ricardo. 2015. Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleraceae* (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43: 180-188.
- Pourjavaher, S., H. Almasi, S. Meshkini, S. Pirsai, and E. Parandi, 2017. Development of a colorimetric pH indicator based on bacterial cellulose nanofibers and red cabbage (*Brassica oleraceae*) extract. *Carbohydrate Polymers*, 156: 193-201.
- Rerkasema, B., S. Jumrusb, N. Yimyamc, and C. Prom-u-thai. 2015. Variation of grain nutritional quality among Thai purple rice genotypes grown at two different altitudes. *Scienceasia*, 41: 377-385.
- Shaari, N., and S. K. Kamarudin. 2015. Chitosan and alginate types of bio-membrane in fuel cell application: An overview. *Journal of Power Sources*, 289: 71-80.
- Shukla, V., G. Kandeepan, M. R. Vishnuraj, and A. Soni. 2016. Anthocyanins based indicator sensor for intelligent packaging application. *Agricultural Research*, 5(2): 205-209.
- Silva-Pereira, M. C., J. A Teixeira, and V. A. Pereira-Junior. 2015. Chitosan/corn starch blend films with extract from *Brassica oleraceae* (red cabbage) as a visual indicator of fish deterioration. *LWT – Food Science and Technology*, 61: 258-262.
- Siracusa, V., P. Rocculi, S. Romani, and M. D. Rosa. 2008. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12): 634-643.

- Sivamaruthi, B. S., P. Kesika, and C. Chaiyasut. 2018. Anthocyanins in Thai rice varieties: distribution and pharmacological significance. *International Food Research Journal*, 25(5): 2024-2032.
- Turhan, K. N., and F. Sahbaz. 2004. Water vapor permeability, tensile properties and solubility of methylcellulose-based edible films. *Journal of Food Engineering*, 61: 459-466.
- Wu, D., S. Hou, J. Chen, Y. Sun, X. Ye, and D. Liu. 2015. Development and characterization of an enzymatic time-temperature indicator (TTI) based on *Aspergillus niger* lipase. *LWT - Food Science and Technology*, 60: 1100-1104.
- Zhang, X., S. Lu, and X. Chen. 2014. A visual pH sensing film using natural dyes from *Bauhinia blakeana* Dunn. *Sensor and Actuators B*, 198: 268-273.
- Zhang, C., A.-X. Yin, R. Jiang, J. Rong, L., and T. Zhao. 2013. Time-temperature indicator for perishable products based on kinetically programmable Ag overgrowth on Au nanorods. *ACS Nano*, 7: 4561-4568.
- Zivanovic, S., S. Chi, and A. F. Draughon. 2005. Antimicrobial activity of chitosan films enriched with essential oils. *Journal of Food Science*, 70 (1): M45-M51



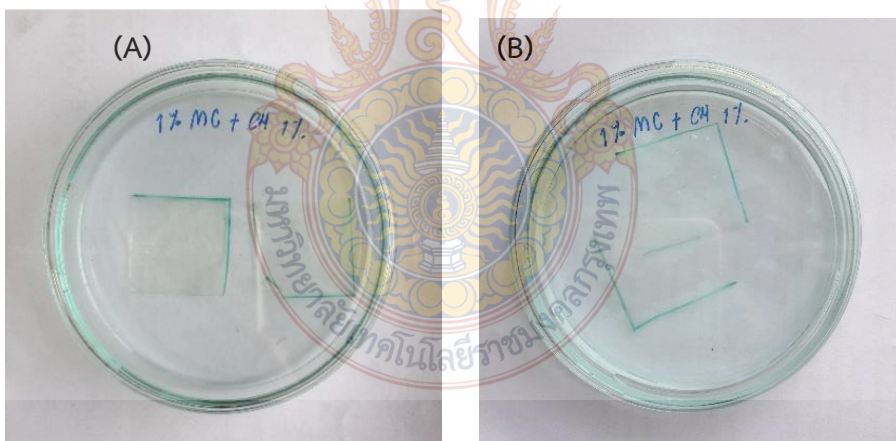
ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม





รูปภาพผนวก ก1 การสุ่มวัดความหนาของฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์

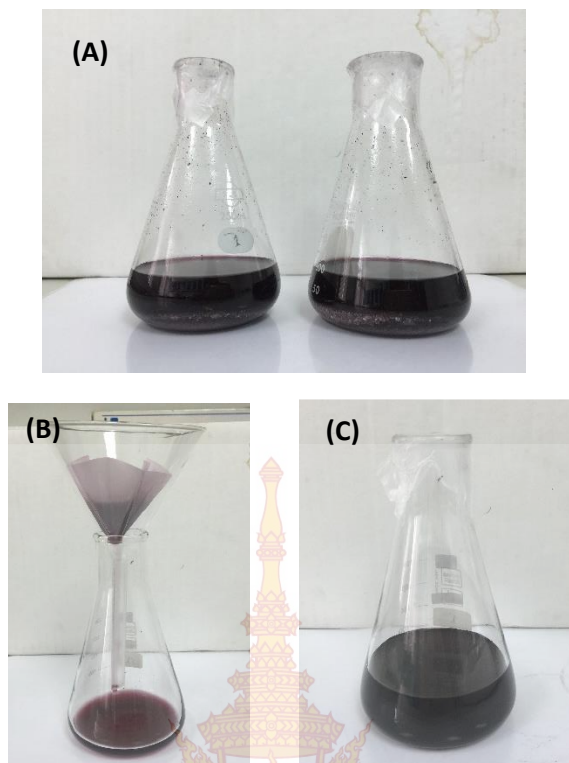


รูปภาพผนวก ก2. การวัดอัตราการละลายน้ำของฟิล์มแสดงตัวอย่างก่อน (A) และระหว่างการวัดการละลายน้ำของฟิล์ม (B)

ภาคผนวก ข

การสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวดำและการเตรียมฟิล์ม

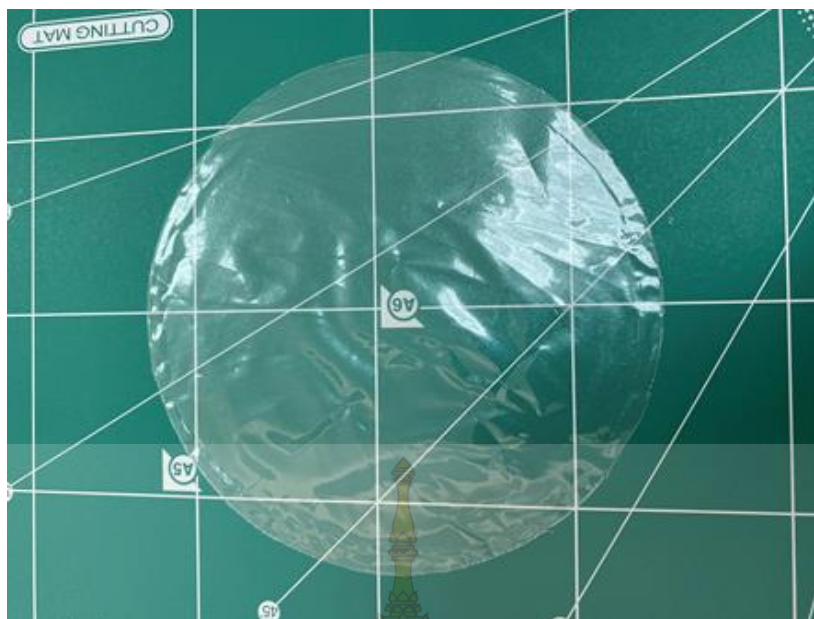




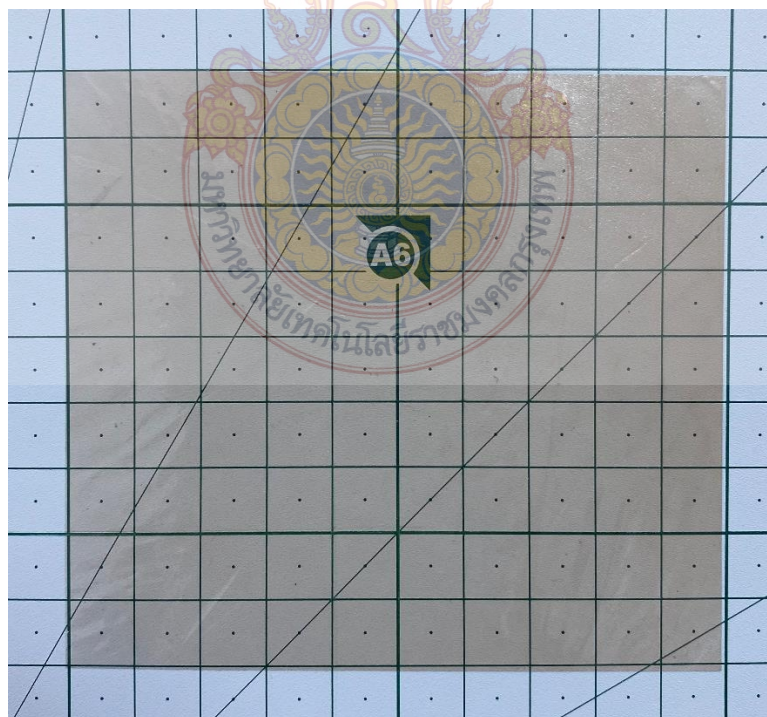
รูปภาคผนวก ข1. ข้าวเก่าที่สกัดด้วยสารละลายอัตราส่วน 1:10 (A) การกรอง (B) และสารสกัดที่กรองแล้ว (C)



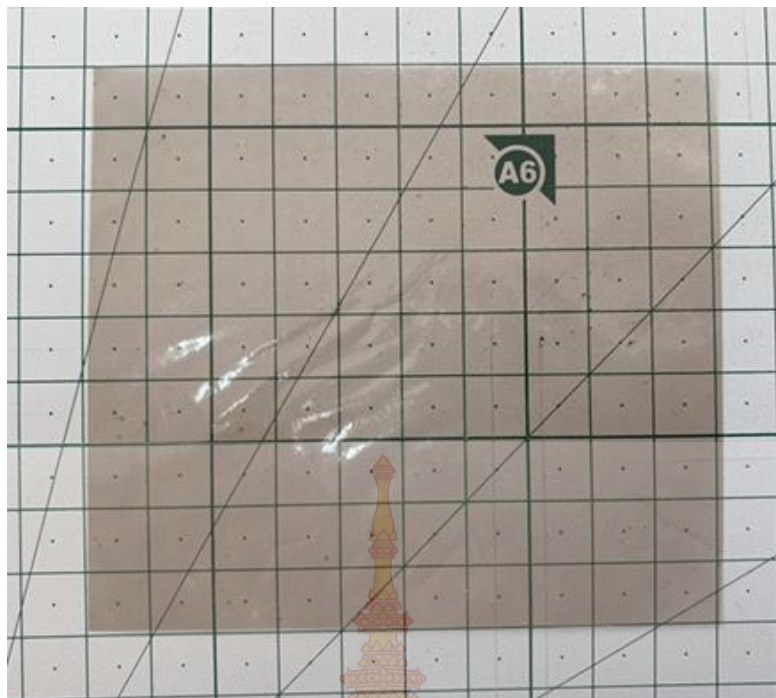
รูปภาคผนวก ข2. การลอกฟิล์มออกจากแม่พิมพ์



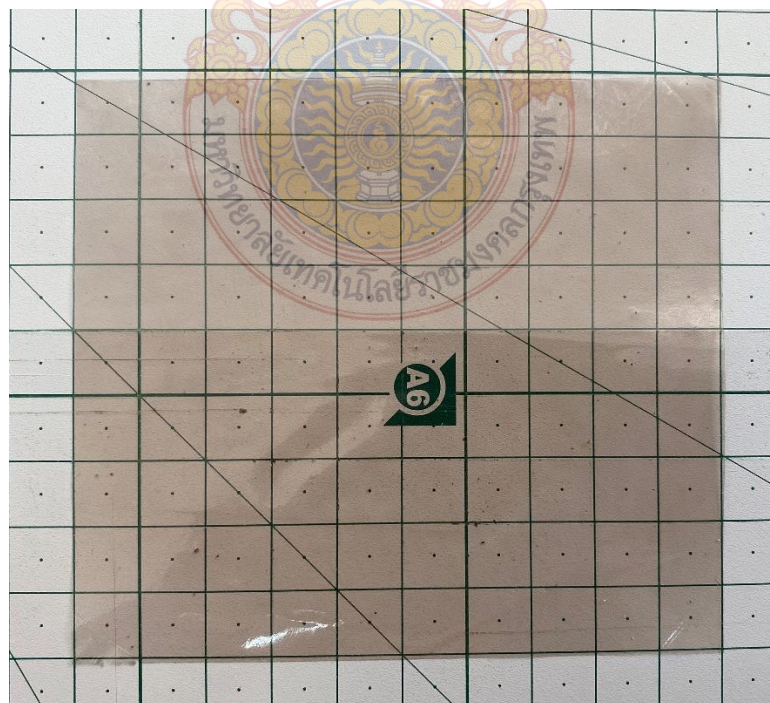
รูปภาคผนวก ข 3 फिल्मสูตรมาตรฐานไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลส



รูปภาคผนวก ข 4 फिल्मไคโตซาน/เมทิลเซลลูโลสที่เติมสารสกัดจากข้าวกล้า 10%



รูปภาคผนวก ข 5 फिल्मโคโตซาน/เมทิลเซลลูโลสที่เติมสารสกัดจากข้าวกล้า 20%

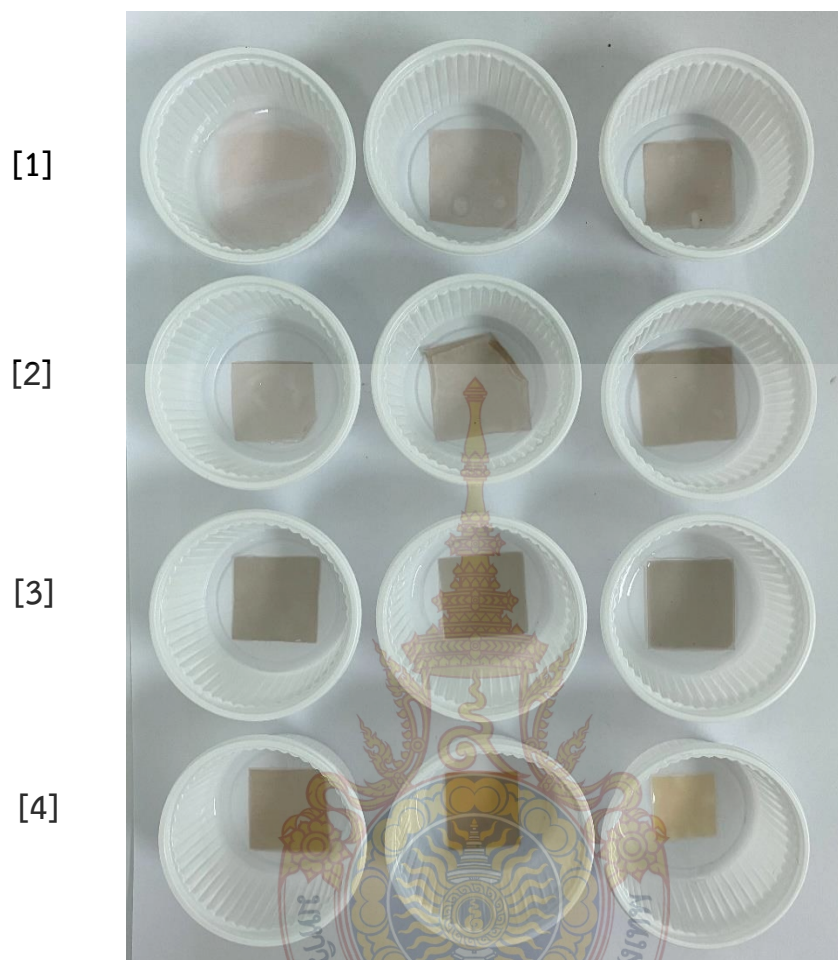


รูปภาคผนวก ข 6 फिल्मโคโตซาน/เมทิลเซลลูโลสที่เติมสารสกัดจากข้าวกล้า 30%

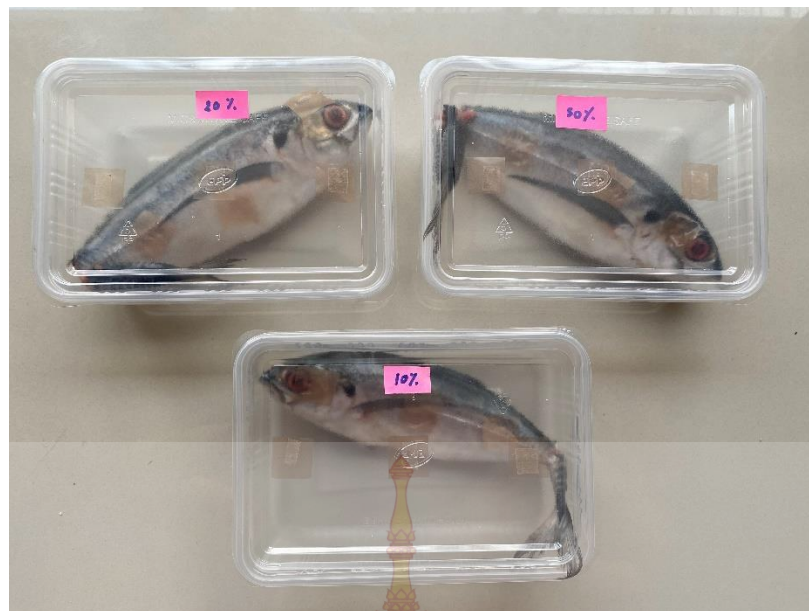
ภาคผนวก ค

การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มในสารละลายพีเอชมาตรฐาน
และในตัวอย่างอาหาร





รูปภาคผนวกที่ ค2 ประสิทธิภาพของฟิล์มไคโตซาน-พีวีเอที่เติมแอนโทไซยานินจากข้าวดำในปริมาณ - 30% ที่ค่าพีเอช 1-12 ในสารละลายพีเอชมาตรฐาน โดยแถวที่ 1-4 จากซ้ายไปขวาแสดงดังนี้ [1] pH 1 2 และ 3 [2] pH 4 5 และ 6 [3] pH 7 8 และ 9 [4] pH 10 11 และ 12



รูปภาพหมวดที่ ค3 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเตอร์ฟิล์มในปลาหางแข็ง ที่บรรจุในกล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิท



รูปภาคผนวกที่ ค4 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเตอร์ฟิล์มในเนื้อสันในไก่ ที่บรรจุในกล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิท



รูปภาคผนวกที่ ค5 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของอินดิเตอร์ฟิล์มในสับปะรดแห้งขึ้น ที่บรรจุใน
กล่องพลาสติกใสมีฝาปิดสนิท