



67H7>AB? 7@F A8B 7D7EBA@E:H78>? 8DA?  
N753D4AJK7F: K>5 ;FAE3@9D38F73GD@ BA>KH@K>  
3>5A: A>fi! AJ;6;L76 3>9,@3F78AD8AA6EBA;>397E7@EAD



<3@DB 4G3=37

3F: 7E EG4? ;FF76;@B3DF;3>8G>8>>? 7@F A8F: 7D7CGD7? 7@F 8ADF: 7  
679D77A8? 3EF7DA8E5;7@57;@BA>K? 7DF75 @A>A9K  
67B3DF? 7@F A85 7? ;EFDKE5 AA>A8E5;7@57  
=@9?A@9=GF E;@EF;FG7A8F75 @A>A9K >36=D343@9  
\$' \$#  
=? ;F>Z' \$#Z5Z? Z #Z' \$\*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5ABKD9. F '\$' \$#

E5: AA>A8E5;7@57

=@?A@9-GF E:@F:FGF7A8F75 @A>A9K >36-D343@9

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือและกำลังใจจากหลาย ๆ ท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษที่คอยดูแล ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์เล่มนี้ที่ให้คำแนะนำและการแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่สามารถทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบเงินทุนอุดหนุนการศึกษาให้ตลอดระยะเวลา 2 ปี

ขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบทุนเสนอผลงานวิจัย ทำให้มีโอกาสนำงานวิจัยไปเผยแพร่แก่ผู้อื่น และได้รับประสบการณ์กับความรู้อีกเพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความรู้จากการเรียนทั้งในวิชาเรียนนอกห้องเรียนและคำแนะนำต่าง ๆ ตั้งแต่ผู้วิจัยได้ก้าวเข้ามาเป็นนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์จนกระทั่งได้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้บรรลุวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการเคมีและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมีที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกทั้งสารเคมี อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้อีกด้วย

ขอขอบพระคุณบิดา - มารดา ที่มอบอนาคตทางการศึกษาในระดับปริญญาโท ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการใช้ชีวิต การเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ตามความคาดหวังอย่างดียิ่ง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาในหลาย ๆ เรื่องและเป็นกำลังใจให้ในยามที่ย่ำแย่หรือเจออุปสรรคต่าง ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นางสาวเจนจิรา บัวแก้ว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ท
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH-responsive materials) .....	4
2.1.1 การประยุกต์ใช้วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช .....	4
2.1.1.1 บรรจุภัณฑ์ .....	4
2.1.1.2 วัสดุปิดแผล .....	5
2.2 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and chitosan) .....	5
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน .....	6
2.2.2 สมบัติของไคโตซาน (properties of chitosan).....	7
2.2.2.1 การละลาย (Solubility).....	7
2.2.2.2 ความหนืด (Viscosity) .....	7
2.2.2.3 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility).....	7
2.2.2.4 การเสื่อมสลาย (Degradation).....	7
2.2.3 ไคโตซานละลายน้ำ (Water-soluble chitosan).....	8
2.2.3.1 ปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล (Michael addition reaction) 9	
2.2.3.2 คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethylchitosan; CECS) 10	
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานของไคตินและไคโตซาน.....	10
2.2.4.1 ด้านการแพทย์.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4.2 ด้านการเกษตร .....	11
2.2.4.3 อุตสาหกรรมอาหาร .....	11
2.2.4.4 อุตสาหกรรมอาหารเสริม .....	11
2.2.4.5 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง .....	11
2.2.4.6 อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย .....	11
2.3 อัลจีเนต (Alginate) .....	12
2.3.1 สมบัติของอัลจีเนต (Properties of alginate) .....	13
2.3.1.1 การละลาย (Solubility) .....	13
2.3.1.2 ความหนืด (Viscosity) .....	14
2.3.1.3 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) .....	14
2.3.2 ออกซิไดซ์อัลจีเนต (Oxidized alginate) .....	14
2.3.2.1 Oxidative cleavage reactions .....	15
2.3.2.2 โครงสร้างของออกซิไดซ์อัลจีเนต .....	16
2.3.2.3 การนำออกซิไดซ์อัลจีเนตไปใช้ประโยชน์ .....	17
2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของอัลจีเนต .....	17
2.3.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร .....	17
2.3.3.2 ด้านการแพทย์ .....	17
2.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) .....	17
2.4.1 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ .....	18
2.4.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ .....	18
2.4.3 การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ .....	19
2.5 สีย้อมออริน (Aurin) .....	20
2.5.1 การเตรียมสีย้อมออริน .....	21
2.5.2 ความปลอดภัย .....	21
2.6 ปฏิกิริยาแมนนิช (Mannich reaction) .....	21
2.7 ปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff base reaction) .....	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>28</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 สารเคมี.....	29
3.3 วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1 การเตรียมสารเคมี.....	30
3.3.1.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ.....	30
3.3.1.2 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	30
3.3.1.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	31
3.3.1.4 การเตรียมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนความเข้มข้น 0.05% โดยมวลต่อปริมาตร.....	31
3.3.1.5 การเตรียมสารละลายเมทิลออเรนจ์ความเข้มข้น 0.05% โดยมวลต่อปริมาตร.....	31
3.3.1.6 การเตรียมสารละลายไฮดรอกซีลามีเนไฮโดรคลอไรด์ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล.....	31
3.3.1.7 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความ เข้มข้น 0.2 โมลาร์.....	31
3.3.1.8 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์.....	31
3.3.1.9 การเตรียมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.05 โมลาร์.....	32
3.3.1.10 การเตรียมสารละลายบอแรกซ์ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์	32
3.3.1.11 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	32
3.3.1.12 การละลายโซเดียมอัลจิเนต.....	33
3.3.1.13 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	33
3.3.2 การสังเคราะห์ออกซีไดซ์อัลจิเนต.....	33
3.3.3 การหาปริมาณแอลดีไฮด์ในโครงสร้างออกซีไดซ์อัลจิเนต.....	33
3.3.4 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานโดยวิธีการเติมแบบไมเคิล.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.3.5 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน (CECS-g-RA) โดยปฏิกิริยาแมนนิช.....	34
3.3.6 การเตรียมฟิล์ม.....	35
3.3.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุพันธ์.....	36
3.3.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค <sup>1</sup> H-NMR.....	36
3.3.7.2 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ.....	38
3.3.8 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของฟิล์ม.....	38
3.3.8.1 ความหนา (Thickness).....	38
3.3.8.2 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	38
3.3.8.3 การวัดเฉดสี.....	39
3.3.8.4 การทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy.....	39
3.3.8.5 การทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยืด (Tensile strength)	40
3.3.8.6 การทดสอบการหาปริมาณความชื้นในฟิล์ม (Moisture content).....	41
3.3.8.7 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling test).....	41
3.3.8.8 การทดสอบหาปริมาณการดูดซับน้ำของฟิล์ม (Water retention capacity).....	41
3.3.8.9 การทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ (Solid remain).....	42
3.3.8.10 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability; WVP).....	42
3.3.8.11 การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH response analysis).....	43
3.3.8.12 การทดสอบการหลุดออกของสีย้อม.....	44
3.3.8.13 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay	44
3.3.9 การทดสอบการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชกับตัวอย่างอาหาร (Food sample measurement).....	45
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 ผลการสังเคราะห์ออกซีไดซ์อัลจินต.....</b>	<b>47</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ผลการหาปริมาณแอลดีไฮด์ในโครงสร้างออกซิไดซ์อัลจินต .....	47
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างออกซิไดซ์อัลจินตด้วยเทคนิค <sup>1</sup> H-NMR.....	48
4.2 ผลการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน .....	48
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค <sup>1</sup> H-NMR .....	49
4.3 ผลการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน .....	50
4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค <sup>1</sup> H-NMR .....	51
4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ.....	52
4.4 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์ม.....	52
4.4.1 สัณฐานวิทยา.....	53
4.4.2 ปริมาณความชื้นในฟิล์ม .....	54
4.4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยืด (Tensile strength).....	54
4.4.4 ผลการทดสอบพฤติกรรมบวมตัว (Swelling test) ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water retention capacity) และปริมาณของแข็งคงเหลือ (Solid remain) .....	56
4.4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability; WVP).....	60
4.4.6 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH responsive analysis).	61
4.4.6.1 ผลการทดสอบการวัดเฉดสี.....	62
4.4.6.2 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสง.....	64
4.4.6.3 ผลการทดสอบด้วยไอ .....	65
4.4.7 ผลการทดสอบการหลุดออกของสีย้อม.....	68
4.4.8 ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay.....	69
4.4.9 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชกับ ตัวอย่างอาหาร .....	69
4.4.9.1 ผลการทดสอบด้วยตัวอย่างนมพลาสเจอไรซ์.....	69
4.4.9.2 ผลการทดสอบด้วยตัวอย่างเนื้อปลา.....	74
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>78</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	80
ประวัติผู้เขียน .....	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติบางประการของสีย้อมออริน .....	20
3.1 เกรดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	29
3.2 ปริมาตรของสารละลายที่ใช้สำหรับเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	32
3.3 ชื่อสูตรและสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์ม .....	35
3.4 สารตัวอย่างและชนิดตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ .....	37
4.1 % ธาตุองค์ประกอบของ CS CECS และ CECS-g-RA .....	52
4.2 ปริมาณน้ำในฟิล์ม.....	54
4.3 ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ .....	61
4.4 สีของฟิล์ม และเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเมื่อสัมผัสไอของแอมโมเนีย .....	66
4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์ Cell viability เฉลี่ยของฟิล์ม .....	69
4.6 ค่าพีเอช เปอร์เซ็นต์ความเป็นกรดของตัวอย่างนมพลาสเจอไรซ์.....	70
4.7 ค่าความแตกต่างของเฉดสีของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบการเน่าเสียของเนื้อปลา.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างสี่ย้อมที่มีตำแหน่งออร์โท; ก) ฟีนอล์ฟทาลีน, ข) ฟีนอลเรด และ ค) ออริน.....	2
2.1 แหล่งที่มาของไคตินและไคโตซาน.....	5
2.2 โครงสร้างทางเคมีของไคติน และไคโตซาน .....	6
2.3 สมการทั่วไปของปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล.....	9
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล .....	9
2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน.....	10
2.6 โครงสร้างทางเคมีของอัลจินต.....	13
2.7 การเกิดเจลของอัลจินตด้วย Multivalent cations ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของเจลที่ ลักษณะคล้ายกล่องไข่.....	14
2.8 ปฏิกิริยาระหว่างไซเดียมเพอร์ไอโอดีตกับสารประกอบประเภท 1,2 Diol .....	15
2.9 กลไกปฏิกิริยา Oxidative cleavage.....	16
2.10 โครงสร้างของออกซิไดซ์อัลจินต.....	17
2.11 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ .....	18
2.12 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส.....	19
2.13 โครงสร้างของสี่ย้อมออริน.....	20
2.14 สมการปฏิกิริยาการเตรียมสี่ย้อมออริน .....	21
2.15 สมการปฏิกิริยาแมนนิช.....	22
2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาแมนนิช.....	22
2.17 สมการปฏิกิริยาซิฟเบส.....	23
2.18 กลไกปฏิกิริยาซิฟเบส .....	24
2.19 กลไกปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส .....	24
3.1 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของไคโตซาน.....	36
3.2 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน.....	37
3.3 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสี่ย้อมออริน .....	37
3.4 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	40
4.1 สมการปฏิกิริยาการสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินต .....	47
4.2 <sup>1</sup> H-NMR spectra ของ SA และ OSA .....	48
4.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน.....	49
4.4 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน.....	49
4.5 <sup>1</sup> H-NMR spectra ของ CS และ CECS.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ปฏิกริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน.....	50
4.7 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน .....	51
4.8 <sup>1</sup> H-NMR spectra ของ CECS-g-RA .....	51
4.9 แบบจำลองการเชื่อมโยงภายในฟิล์ม.....	53
4.10 สัณฐานวิทยาของฟิล์มสูตร CR55P2A ก) ภาพตัดขวางของฟิล์มที่กำลังขยาย 2000x และ ข) ภาพพื้นผิวของฟิล์มที่กำลังขยาย 2000x.....	53
4.11 (ก) ค่าความแข็งแรงดึง และ (ข) เเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	55
4.12 กราฟแสดงพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย; (ก) น้ำ, (ข) บัฟเฟอร์ pH 4 และ (ค) บัฟเฟอร์ pH 9 ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	58
4.13 ร้อยละการดูดซับน้ำในฟิล์มหลังแช่ในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	59
4.14 ร้อยละของแข็งคงเหลือของฟิล์มหลังแช่ในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	59
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับเวลาในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ.....	60
4.16 สีของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4-14.....	62
4.17 ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR55P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อแช่สารละลายบัฟเฟอร์.....	63
4.18 กราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 14 .....	64
4.19 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมออรินในโครงสร้างของ CECS-g-RA .....	65
4.20 ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR55P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อสัมผัสไอของแอมโมเนีย.....	67
4.21 กราฟการดูดกลืนของเอทานอลหลังแช่ฟิล์ม 48 ชั่วโมง.....	68
4.22 ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR55P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อทดสอบด้วยตัวอย่างนมพลาสเจอร์ไรซ์.....	71
4.23 กราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์ม (ก) สัมผัสตัวอย่างนม และ (ข) ไม่สัมผัสตัวอย่างนม .....	73
4.24 สีของฟิล์ม CR55P2A ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบการเน่าเสียของเนื้อปลา.....	74
4.25 ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR55P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อทดสอบด้วยตัวอย่างเนื้อปลา.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
CS	Chitosan
SA	Sodium alginate
CECS	Carboxyethyl chitosan
CECS-g-RA	Carboxyethyl chitosan-grafted-Rosolic acid
PVA	Poly(vinyl alcohol)
OSA	Oxidized alginate
RA	Rosolic acid/Aurin
NMR	Nuclear magnetic resonance spectrometer
EA	Elemental analyzer
$\delta$	Chemical shift
DS	Degree of substitution
DD	Degree of deacetylation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

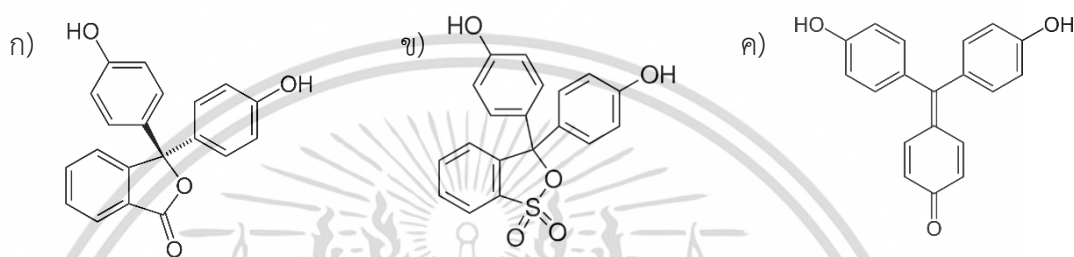
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH-responsive materials) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยสารที่สามารถเกิดการตอบสนองได้ที่ค่าพีเอชเฉพาะตัว เช่น สารอินทรีย์อาจเป็นกรดหรือเบสอ่อน ๆ ซึ่งสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเปลี่ยนไป ในปัจจุบันวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชนั้นได้รับความสนใจ และมีการพัฒนากันอย่างแพร่หลายโดยวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชนั้นสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น แผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจล เส้นใย เป็นต้น วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านต่าง ๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรมอาหาร เช่น บรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อตรวจสอบคุณภาพของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ [1] ทางด้านการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผล เพื่อเฝ้าติดตามการติดเชื้อของบาดแผล [2]

สารตั้งต้นชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการทำวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชคือพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเลียม เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิอะคริลาไมด์ ซึ่งมีงานวิจัยที่นำพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาใช้ในการทำฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปิดแผล [3-4] แต่การใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพนั้นอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงได้รับความสนใจมากขึ้นในการนำมาทำเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเข้ากันได้ดีกับร่างกายของมนุษย์ โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ในการทำวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช เช่น ไคโตซาน อัลจิเนต และแป้ง เป็นต้น นอกจากวัตถุดิบที่กล่าวมาข้างต้นยังมีอีกหนึ่งองค์ประกอบที่มีความสำคัญในการทำวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชนั่นคือสารที่สามารถเกิดการตอบสนองได้ที่ค่าพีเอชเฉพาะตัวโดยมักเป็นสารอินทรีย์ประเภทสีย้อม โดยตัวอย่างสีย้อมที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ คลอโรฟินอลเรด โบรโมฟินอลบลู ฟีนอลเรด ซึ่งเป็นสีย้อมที่ได้มาจากการสังเคราะห์ [5] และสีย้อมธรรมชาติ ได้แก่ แอนโทไซยานิน เป็นสารสกัดที่ได้มาจากกระหล่ำปลีม่วง [6] ซึ่งสีย้อมต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อมีค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป

ในปัจจุบันการเตรียมวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่ได้รับความนิยมในการเตรียมวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชคือ การผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันโดยตรง โดยมีงานวิจัยที่ขึ้นรูปฟิล์มที่ตอบสนองจากค่าพีเอชจากไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และแอนโทไซยานิน โดยการผสมสารทั้ง 3 ชนิดเข้าด้วยกันแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร [7] โดยที่การเตรียมวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชด้วยวิธีการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันโดยตรงนั้นมีข้อดีที่สามารถทำได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดคือ เกิดการปนเปื้อนจากการหลุดออกของสีย้อม อีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชคือ การตัดแปรรูปโครงสร้างของสีย้อมเข้ากับมอโนเมอร์แล้วนำไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปิดแผล ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อน [8] ปฏิกิริยาหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้เตรียมวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชคือ ปฏิกิริยาแมนนิช (Mannich reaction) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโน ฟอรัมาลดีไฮด์ และสีย้อมที่มีตำแหน่งออร์โท (Ortho position) อยู่ในโครงสร้าง เช่น ฟีนอลฟทาลีน ฟีนอลเรด และออริน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 1.1 โดยจะเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยหมู่เมทิลีน (Methylene bridge; -CH<sub>2</sub>-) ระหว่างหมู่อะมิโน และตำแหน่งออร์โทของสีย้อม



รูปที่ 1.1 โครงสร้างสีย้อมที่มีตำแหน่งออร์โท : ก) ฟีนอลฟทาลีน, ข) ฟีนอลเรด และ ค) ออริน

จากปฏิกิริยาแมนนิชทำให้สามารถตัดแปรรูปโครงสร้างของพอลิเมอไรต์โดยการต่อกิ่งด้วยสีย้อมเข้าไปบนโครงสร้างของพอลิเมอไรต์ โดยพบงานวิจัยที่มีการใช้ปฏิกิริยาแมนนิชในการต่อกิ่งสีย้อมฟีนอลฟทาลีนเข้ากับเส้นใยพอลิเอคริลอไนไตรล์ [9] และการต่อกิ่งสีย้อมฟีนอลฟทาลีน หรือ สีย้อมออรินเข้ากับโครงสร้างของไคโตซาน [10, 45] ทำให้สามารถลดปัญหาการหลุดออกของสีย้อมได้ และเป็นปฏิกิริยาที่สามารถทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน จึงเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่น่าสนใจในการนำมาใช้เตรียมวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช

งานวิจัยนี้มีความสนใจในการพัฒนาวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช โดยทำการต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรินบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethyl chitosan; CECS) ผ่านปฏิกิริยาแมนนิช โดยปฏิกิริยาจะเกิดการเชื่อมต่อกันด้วย Methylene bridge ที่ตำแหน่งหมู่อะมิโนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน และตำแหน่งออร์โทในโครงสร้างของสีย้อมออริน ทำการเตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจากคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานที่ต่อสีย้อมออริน ออกซิไดซ์อัลจินेट และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากโครงสร้างของออกซิไดซ์อัลจินेटที่มีหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาซิฟเบสที่ตำแหน่งหมู่อะมิโนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานที่ต่อสีย้อมออริน แล้วเกิดเป็นพันธะอิมีน (Imine) และจากโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชที่ได้นั้นมีความคงทนมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการตอบสนองต่อค่าพีเอช โดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่เตรียมได้

ในช่วงพีเอชที่สีย้อมออรีนเกิดการตอบสนอง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มที่มีสมบัติการตอบสนองต่อค่าพีเอชจากคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรีน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดซ์อัลจินต
- 2) เพื่อศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรีนด้วยปฏิกิริยาแมนนิช

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์อนุพันธ์ของไคโตซาน โซเดียมอัลจินต โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นได้แก่
  - 1.1 สังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานจากปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ D-glucosamine ต่อกรดอะคริลิกเท่ากับ 1:2
  - 1.2 สังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรีนด้วยปฏิกิริยาแมนนิช โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ D-glucosamine ในคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสีย้อมออรีนเท่ากับ 1:0.1:0.5
  - 1.3 สังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินตจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของหน่วยซ้ำของโซเดียมอัลจินตต่อโซเดียมเพอร์ไอโอดีตเท่ากับ 1:1
- 2) เตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจากคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานที่ต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรีน ออกซิไดซ์อัลจินต และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
- 3) ทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช ได้แก่ การตอบสนองของฟิล์มเมื่ออยู่ในสภาวะกรด-เบส ความแข็งแรงดึง การบวมตัวของฟิล์ม และการทดสอบการเน่าเสียของอาหาร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงขั้นตอนและวิธีการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน ออกซิไดซ์อัลจินต และคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรีน
- 2) สามารถเตรียมฟิล์มที่สามารถตอบสนองต่อค่าพีเอชและนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH-responsive materials) [11-12]

วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชเป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช เช่น การเปลี่ยนสีเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น โดยวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชส่วนใหญ่มีสารประกอบประเภทฮาโลโครมิก (Halochromic compound) เป็นองค์ประกอบเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชหรือความเป็นกรด-เบส

สารประกอบฮาโลโครมิกเป็นสารที่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช คำว่า Chromic หมายถึงวัสดุที่สามารถเปลี่ยนสีแบบย้อนกลับเมื่อมีปัจจัยต่าง ๆ มากกระตุ้น โดยในกรณีนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคือ ค่าพีเอช สารประกอบฮาโลโครมิกเป็นตัวบ่งชี้ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเกิดขึ้นบ่อยครั้งหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชอย่างรุนแรง สารประกอบฮาโลโครมิกทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดของสาร เช่น การตรวจจับการกักตร้อนโลหะ หรือใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อกำหนดค่าพีเอชของสารละลายที่ไม่ทราบค่า โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบสี การเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบฮาโลโครมิกเกิดขึ้นเมื่อเกิดการจับกับไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออน พันธะที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระบบคอนจูเกต (Conjugate system) หรือเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้ความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืนด้วยโครงสร้างของสารประกอบฮาโลโครมิกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่สามารถมองเห็นได้ สารประกอบฮาโลโครมิกไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ในทุกค่าพีเอช โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีในช่วงค่าพีเอชที่โครงสร้างในระบบคอนจูเกตสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเกณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความเข้มข้น และระบบคอนจูเกตที่แตกต่างกันของสารประกอบฮาโลโครมิก

#### 2.1.1 การประยุกต์ใช้วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช

##### 2.1.1.1 บรรจุภัณฑ์

วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชนั้นสามารถนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์เพื่อตรวจสอบคุณภาพอาหารได้ เช่น นม เนื้อสัตว์ ปลา กุ้ง เมื่อเกิดการเน่าเสียจากการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ หรือการปล่อยสารระเหยไนโตรเจน (Volatile nitrogen compounds) เป็นต้น ทำให้ค่าพีเอชเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงสามารถใช้วัสดุตอบสนองต่อค่าพีเอชเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อแสดงถึงการเน่าเสียของอาหารได้ โดยมีตัวอย่างงานวิจัยนำฟิล์มที่เตรียม

จากอาการและแป้งมันสำปะหลังผสมกับสีย้อมแอนโทไซยานินมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถตรวจสอบคุณภาพของเนื้อหมูได้จากการเปลี่ยนสีของแอนโทไซยานิน [13]

### 2.1.1.2 วัสดุปิดแผล

การประยุกต์ใช้วัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชเพื่อใช้เป็นวัสดุปิดแผล บาดแผลที่เกิดการติดเชื้อหรืออักเสบ ค่าพีเอชที่บริเวณแผลนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้สีของวัสดุปิดแผลนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ ตัวอย่างงานวิจัย เช่น การนำวัสดุปิดแผลจากไคโตซานที่ผสมสีย้อมฟีนอลเรดมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นปิดแผลที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชเมื่อแผลเกิดการอักเสบสีของฟีนอลเรดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจึงใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงการติดเชื้อของบาดแผลได้ [14]

## 2.2 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan) [15]

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ประเภทพอลิแซคคาไรด์ที่มีสายโซ่ยาวมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ไคตินมีชื่อเรียกทางเคมีว่า Poly- $\beta$ -(1,4)-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly-N-acetyl-glucosamine ซึ่งโมเลกุลของไคตินมีหน่วยย่อยที่เรียกว่า N-acetyl-D-glucosamine เป็นอนุพันธ์ของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) แบบ  $\beta$ -1,4 แต่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ตำแหน่ง C-2 ของเซลลูโลสถูกแทนที่ด้วยกลุ่ม Acetyl amino (-NHCOCH<sub>3</sub>) มีสูตรทั่วไปเป็น (C<sub>8</sub>H<sub>13</sub>NO<sub>5</sub>)<sub>n</sub>

ไคตินพบได้ในสิ่งมีชีวิตทั่วไป โดยพบมากในสิ่งมีชีวิตที่มีเปลือกหรือผนังแข็งหุ้มลำตัว เช่น กุ้ง ปู หอย แมลง รวมถึงผนังเซลล์ของเชื้อรา ยีสต์ และสาหร่าย สารนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างร่างกาย เมื่อพิจารณาโครงสร้างของไคตินพบว่า ไคตินเป็นโมเลกุลสายโซ่ยาวที่ไม่มีประจุอยู่บนสายโซ่ ทำให้ไคตินไม่ละลายในเบสเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ แต่ไคตินละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ กรดฟอสฟอริก กรดกำมะถัน และกรดฟอร์มิกที่ปราศจากน้ำ ทำให้การใช้ประโยชน์ของไคตินไม่เป็นที่แพร่หลาย จึงมีการดัดแปลงไคตินให้เป็นไคโตซาน เพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานให้มากยิ่งขึ้น

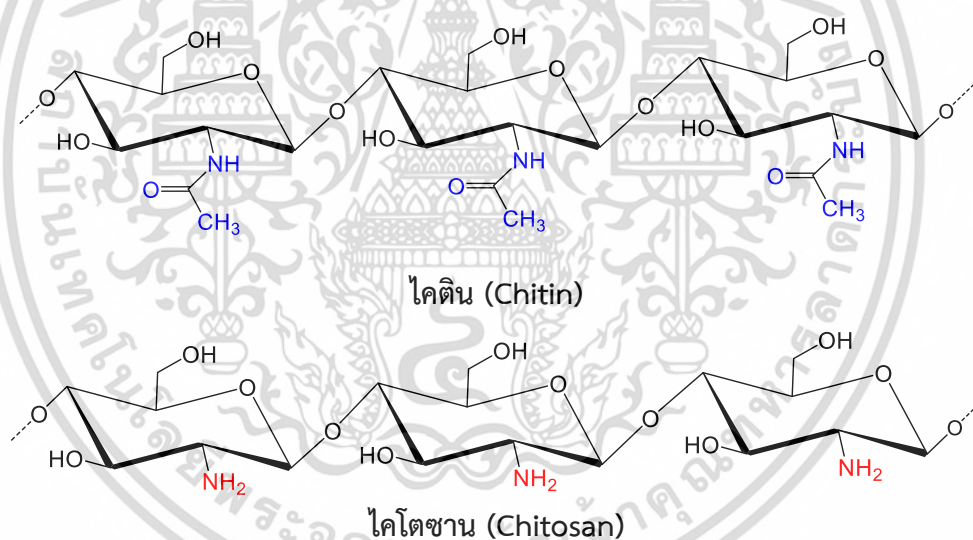


รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของไคตินและไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน มีชื่อเรียกทางเคมี คือ Poly- $\beta$ -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_8H_{11}O_4N)_n$  ซึ่งเกิดจากการกำจัดหมู่อะเซทิลของไคตินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้หมู่อะเซตามิโน ( $-NHCOCH_3$ ) ของไคตินเปลี่ยนไปเป็นหมู่เอมิโน ( $-NH_2$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของหน่วยซ้ำบนสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ไคโตซานมีส่วนของโมเลกุลที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหลายหมู่ ซึ่งรวมถึงหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6

ความแตกต่างของไคตินและไคโตซาน คือ องศาการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation) แต่ปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะเซทิลมักเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2 มอนอเมอร์ของ *N*-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamin ในสัดส่วนที่ต่างกัน ถ้าหมู่อะเซทิลถูกตัดไปประมาณร้อยละ 60 ไคตินจะเปลี่ยนไปเป็นไคโตซาน โดยทั่วไปไคโตซานจะมีองศาการกำจัดหมู่อะเซทิลอยู่ประมาณร้อยละ 70-95 ซึ่งการตัดหมู่อะเซทิล ส่งผลให้สมบัติการละลายเปลี่ยนไป กล่าวคือไคโตซานจะสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดอะซิติก สารละลายกรดฟอร์มิก เป็นต้น รวมถึงยังสามารถละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก จึงทำให้ไคโตซานถูกนำมาใช้ประโยชน์มากกว่าไคติน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน

### 2.2.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของไคโตซาน

- 1) ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงมีความปลอดภัยในการใช้กับมนุษย์ สัตว์ และไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม
- 2) ไคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก สามารถเกิดปฏิกิริยากับของแข็งอินทรีย์และพื้นผิวเซลล์ที่มีประจุลบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ไคโตซานมีหมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิลหลายตำแหน่ง สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น ๆ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารอนุพันธ์ได้มากมาย ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแพร่หลาย
- 4) ไคโตซานสามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ เช่น เจล เม็ด เส้นใย फिल्म สารเคลือบ เป็นต้น ทำให้มีการนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างแพร่หลาย

## 2.2.2 สมบัติของไคโตซาน (properties of chitosan) [16]

### 2.2.2.1 การละลาย (Solubility)

การละลายเป็นการทำให้เกิดพันธะระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย ดังนั้นการละลายจึงขึ้นอยู่กับการยอมให้โมเลกุลของตัวทำละลายแทรกผ่านไปได้ดีหรือไม่ ซึ่งไคโตซานมีโครงสร้างที่แข็งแรง เนื่องจากโมเลกุลของไคโตซานเชื่อมด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายไม่สามารถแทรกผ่านเข้าไปในโมเลกุลของไคโตซานได้ จึงทำให้ไคโตซานไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายทั่ว ๆ ไป รวมถึงไม่สามารถละลายได้ในเบสเจือจางและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไคโตซานละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจางเกือบทุกชนิดที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 6 เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดซิตริก นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายกรดอนินทรีย์เจือจางบางชนิด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น

### 2.2.2.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ระยะเวลา ค่าพีเอช อุณหภูมิ และระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล ความหนืดของสารละลายไคโตซานจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ นอกจากอุณหภูมิ ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารก็ส่งผลให้ความหนืดของไคโตซานที่ได้แตกต่างกัน

### 2.2.2.3 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility)

ไคโตซานได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งด้านการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร รวมถึงได้รับการอนุมัติจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ให้นำไคโตซานมาใช้เป็นวัสดุปิดแผล และมีการศึกษาทางด้านชีวการแพทย์พบว่าไคโตซานมีความเข้ากันได้กับสารชีวภาพสูง

### 2.2.2.4 การเสื่อมสลาย (Degradation)

ไคโตซานเมื่อเกิดการเสื่อมสลายจะให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลง เป็นโอลิโกเมอร์หรือโอลิโกแซคคาไรด์ และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุด เรียกว่า มอนอเมอร์หรือมอนอแซคคาไรด์

#### 1) การเสื่อมสลายโดยกรด (Acid hydrolysis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสื่อมสลายของสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานเนื่องจากกรด จะเป็นแบบสุ่ม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นโอลิโกเมอร์ขนาดต่าง ๆ และมอนอเมอร์ ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ เช่น ชนิดของกรด อุณหภูมิ เวลา ชนิดของพอลิเมอร์ เป็นต้น ไคตินสามารถต้านทานต่อการเสื่อมสลายโดยกรดได้ดีกว่าไคโตซาน

#### 2) การเสื่อมสลายด้วยเบส (Alkaline hydrolysis)

การเสื่อมสลายของสายโซ่โพลีเมอร์ของไคโตซานด้วยเบสจะเริ่มจากปลายสุดของสายโซ่โพลีเมอร์ การเสื่อมสลายนี้เรียกว่า Peeling reaction

#### 3) การเสื่อมสลายโดยเอนไซม์ (Enzymic degradation)

การเสื่อมสลายโดยเอนไซม์ จะมีความจำเพาะเจาะจงมากกว่าการใช้สารเคมี ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายไคตินและไคโตซาน ได้แก่ Chitinase Chitosanase Lysozyme *N*-acetylglucosaminidase และ *N*-acetylhexosaminidase

#### 4) การเสื่อมสลายโดยใช้ความร้อน (Thermal degradation)

ความร้อนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของไคโตซาน พบว่าความร้อนจากเตาอบซึ่งเป็นความร้อนแบบแห้ง (Dry heat) ที่อุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสมีผลทำให้สายโซ่โพลีเมอร์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T<sub>g</sub>) ลดลง ส่งผลให้มีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงทำให้ไคโตซานมีสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล ขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ ที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายของไคโตซานจะลดลง และที่อุณหภูมิเท่ากับ 160 องศาเซลเซียสเวลานานกว่าหรือเท่ากับ 2 ชั่วโมง ไคโตซานจะไม่ละลายในกรดแอสซิดิก (0.2 M) / โซเดียมแอสซิด (0.1 M)

การอบแห้งแบบใช้ไอร้อน (Saturation steam) ไคโตซานไม่สามารถละลายได้หลังจากอบที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือหลังจากการอบที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่เมื่ออบที่อุณหภูมिन้อยกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสมบัติทางกายภาพของไคโตซาน

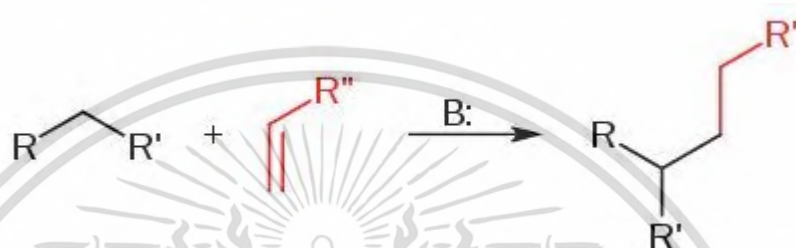
### 2.2.3 ไคโตซานละลายน้ำ (Water-soluble chitosan)

ปัจจุบันไคโตซานนิยมนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ อย่างไรก็ตามไคโตซานมีข้อจำกัดด้านสมบัติการละลายเนื่องจากไคโตซานมีโครงสร้างที่แข็งแรง เพราะมีการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบในโครงสร้าง ทำให้โพลีเมอร์ของตัวทำละลายแทรกผ่านเข้าไปในโครงสร้างโพลีเมอร์ของไคโตซานได้ยากจึงทำให้ไคโตซานไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของไคโตซานจึงมีการปรับปรุงโครงสร้างของไคโตซานให้สามารถละลายน้ำได้ เช่น การใช้ปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิลในการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานเนื่องจาก

เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีที่ไม่รุนแรง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

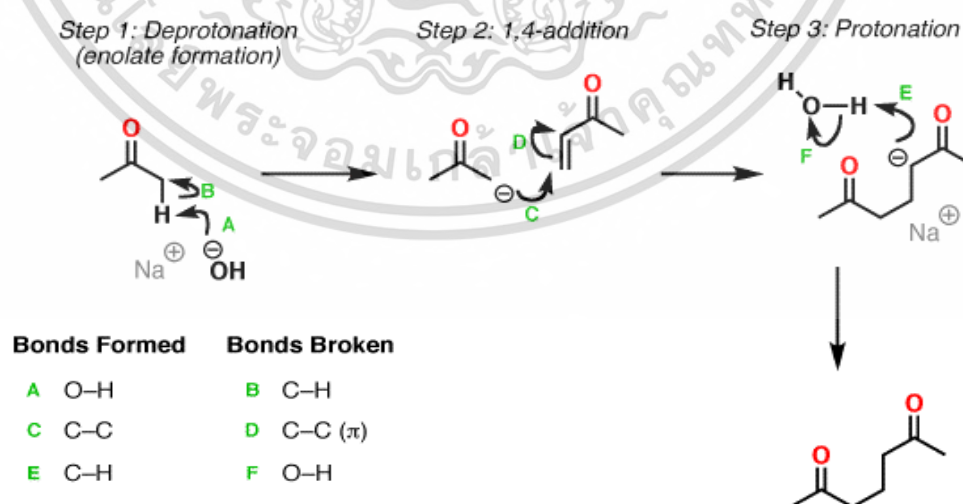
### 2.2.3.1 ปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล (Michael addition reaction) [17-18]

ปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล เป็นปฏิกิริยาการเติมด้วยหมู่นิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) หรือคาร์แบนไอออน (Carbanion) เช่น อินอเลทแอนไอออน (Enolate anion) หมู่ไซยาโน (Cyano groups) และ หมู่เอซิล (Acyl groups) ที่สามารถเกิดเป็นคาร์แบนไอออนได้เมื่อทำปฏิกิริยากับเบส เป็นต้น โดยนิวคลีโอไฟล์เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่บนสารประกอบคาร์บอนิลที่ไม่อิ่มตัว ( $\alpha, \beta$ -unsaturated carbonyl compound) สมการปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สมการทั่วไปของปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล [18]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการสร้างคาร์แบนไอออน โดยเบสเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอนิล เช่น คีโตนหรือเอสเทอร์ ไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอัลฟาจะถูกดีโปรตอนเต (Deprotonated) เกิดเป็นโครงสร้างอินอเลท จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเติม (1,4-addition) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของสารประกอบคาร์บอนิลที่ไม่อิ่มตัว ในขั้นตอนสุดท้ายเกิดการโปรตอนเตได้เป็นสารประกอบไดคาร์บอนิล (Dicarbonyl compound) แสดงดังรูปที่ 2.4

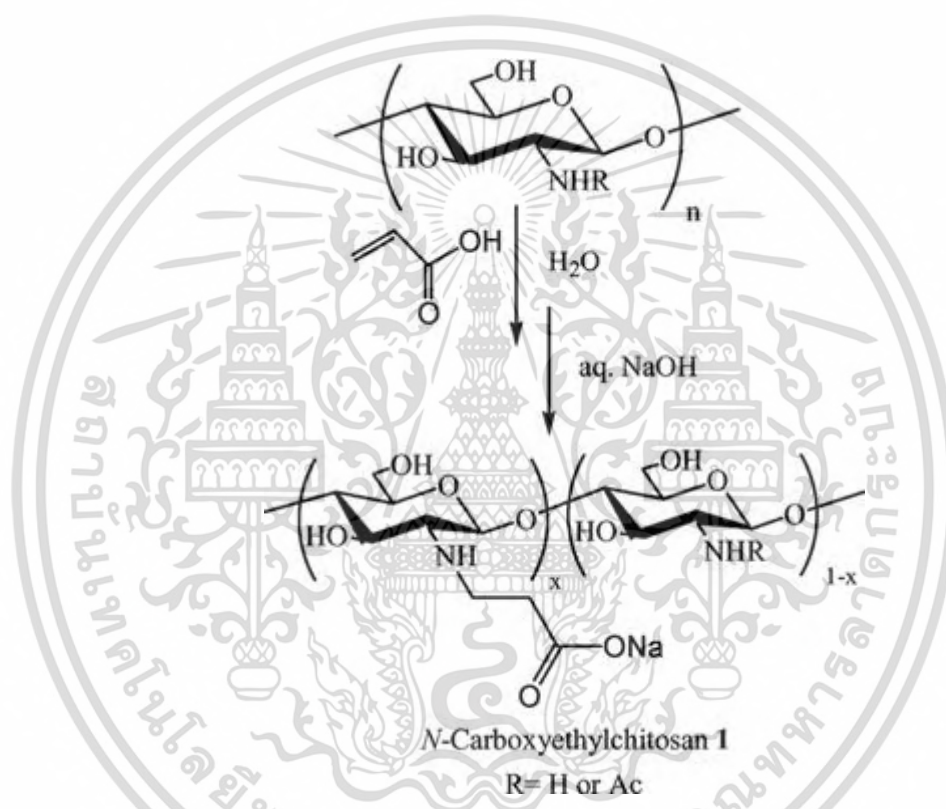


รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.2 คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethylchitosan; CECS) [19]

คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานเป็นไคโตซานที่ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยกรดอะคริลิก โดยกรดอะคริลิกทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายไคโตซาน และเป็นรีเอเจนต์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล ในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการละลายได้ดีในน้ำ และสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าไคโตซาน นอกจากนี้คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานสามารถนำมาใช้เป็นพอลิเมอร์ผสมร่วมกับสารตัวอื่นได้ เช่น โซเดียมอัลจิเนต เป็นต้น ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน แสดงดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน

### 2.2.4 การประยุกต์ใช้งานของไคตินและไคโตซาน [20]

#### 2.2.4.1 ด้านการแพทย์

ไคโตซานได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่ส่งผลเสียต่อร่างกายมนุษย์ จึงนิยมนำมาทำเป็นวัสดุรักษาหรือตกแต่งบาดแผล เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งช่วยป้องกันการติดเชื้อของแผล กระตุ้นการผลิตและสร้างเซลล์ใหม่ รวมทั้งยังสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นแคปซูลบรรจุยา สารลดคอเลสเตอรอล หนังกเทียม สารเชื่อมหรืออุดฟัน และใช้ทำคอนแทคเลนส์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.4.2 ด้านการเกษตร

ไคโตซานสามารถนำมาใช้เคลือบผิวผลผลิตทางการเกษตร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ผลผลิตและเมล็ดพันธุ์ ใช้ในการยับยั้งเชื้อซึ่งเป็นสาเหตุของโรคพืชโดยผลิตเป็นสารต่อต้านเชื้อรา ไวรัส และแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารเสริมผสมในอาหารสัตว์ เช่น สุกกร วัว ไก่ เพื่อเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหาร และช่วยลดอาการท้องเสียของสัตว์ได้

#### 2.2.4.3 อุตสาหกรรมอาหาร

ไคโตซานมีสมบัติในการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีกลไกที่สำคัญคือ จากโครงสร้างของไคโตซานที่มีประจุบวกจึงสามารถจับกับประจุลบบนเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่น ๆ ของเซลล์ ไคตินและไคโตซานเป็นสารที่ใช้เติมในอาหารได้ โดยนำไปใช้เป็นสารให้ความหนืด สารช่วยรักษากลิ่น รส และสารกันบูด นอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสด หรือผลิตในรูปของฟิล์มที่สามารถรับประทานได้ (Edible film)

#### 2.2.4.4 อุตสาหกรรมอาหารเสริม

ไคโตซานสามารถช่วยลดคอเลสเตอรอล และไขมันในเส้นเลือดได้ โดยไคโตซานจะไปจับกับคอเลสเตอรอลทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมหรือดูดซึมน้อยลง และจากการที่ร่างกายไม่สามารถย่อยไคโตซานได้จึงทำให้คอเลสเตอรอล และไขมันส่วนเกินถูกขับออกมาพร้อมกับไคโตซานจึงนำไคโตซานมาใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเสริมลดน้ำหนัก

#### 2.2.4.5 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้นำไคโตซานไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางสำหรับผิวแห้ง และเส้นผม จากโครงสร้างของไคโตซานที่มีประจุบวกทำให้สามารถจับกับประจุลบของผิวแห้ง และเส้นผมได้ มีการนำไคโตซานมาใช้ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดแอลฟาไฮดรอกซี เพื่อทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ และในผลิตภัณฑ์บำรุงเส้นผมไคโตซานจะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมทำให้เส้นผมคงสภาพไม่เสียหาย

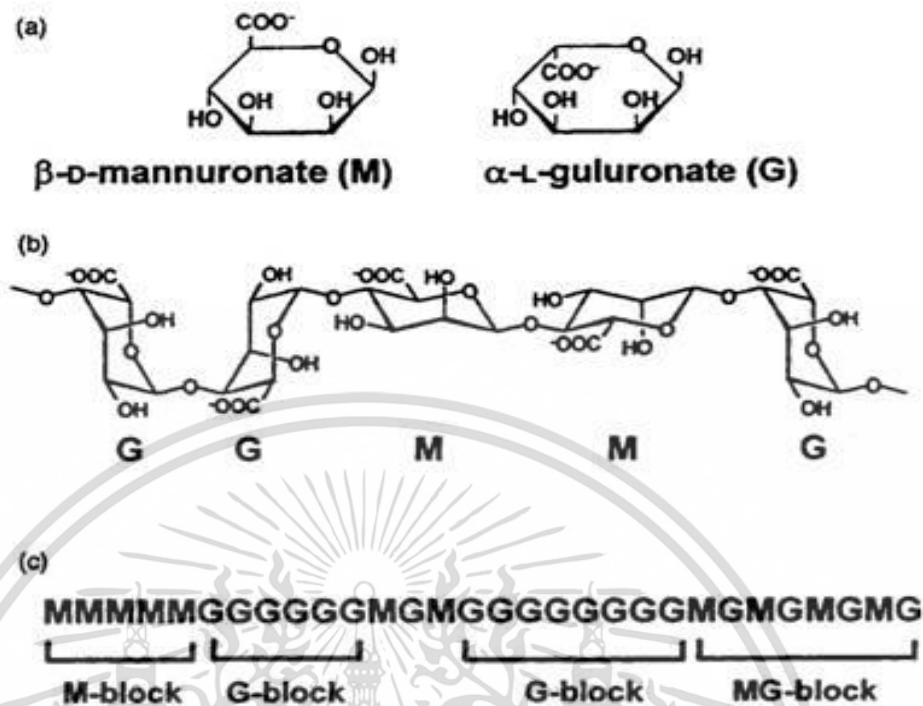
#### 2.2.4.6 อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย

จากโครงสร้างของไคโตซานที่มีประจุบวกจึงสามารถจับกับโปรตีน และไขมันในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมอาหารที่มีสารแขวนลอยสูง นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้

## 2.3 อัลจิเนต (Alginate) [21]

อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ประเภทพอลิแซคคาไรด์ ที่เป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) อัลจิเนตเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ในการผลิตอัลจิเนตในอุตสาหกรรมสาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณ 14-19 %, *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่ว ๆ ไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น นอกจากนี้ยังพบว่ามีแบคทีเรียที่สามารถผลิตอัลจิเนตได้ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มตรึงไนโตรเจนอิสระ ได้แก่ *Azotobacter vinelandii* และ *Pseudomonas aeruginosa* เป็นต้น ปริมาณและสมบัติของอัลจิเนตที่ได้จากสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดแตกต่างกันตามชนิด และสิ่งแวดล้อม

อัลจิเนตเป็น โคพอลิเมอร์สายโซ่ตรงของ 1,4-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย Homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G-blocks และ M-blocks ตามลำดับ และยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks ดังรูปที่ 2.6 สัดส่วนของโคพอลิเมอร์ และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มีสัดส่วนของ G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็งเมื่อมีโลหะประจุบวก (Polyvalent metal cation) อยู่ในโครงสร้าง แต่ถ้าพอลิเมอร์มีสัดส่วนของ M ในปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสภาพในการเกิดเจลที่กว้างกว่า อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายทางการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่แตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลียวแคลเซียม โปแทสเซียม โซเดียม แอมโมเนียม และยังผลิตในรูปของโพรพิลีนไกลคอลอัลจิเนต (Propylene glycol alginate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดอัลจินิก (Alginic acid) กับ โพรพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) ภายใต้ความดัน อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น โดยที่ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และการมีโลหะประจุบวก



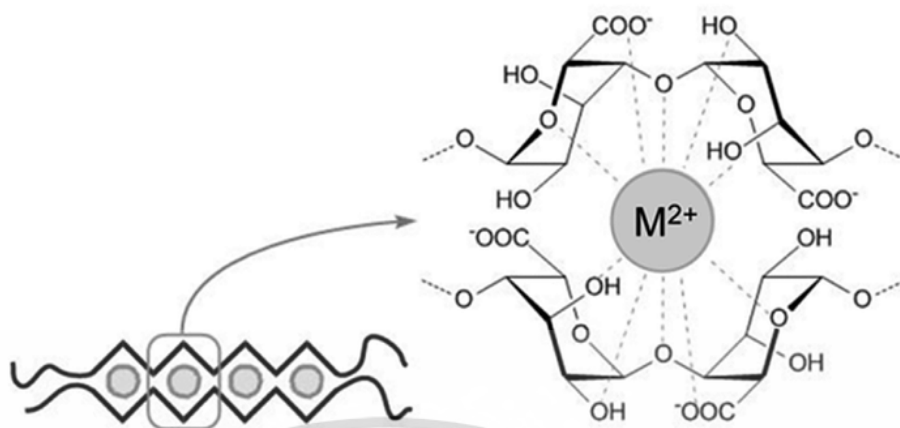
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต [22]

### 2.3.1 สมบัติของอัลจิเนต (Properties of alginate)

#### 2.3.1.1 การละลาย (Solubility)

ความสามารถในการละลายน้ำของอัลจิเนตขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอชของตัวทำละลาย ความแข็งแรงไอออนิกของตัวกลาง และการมีไอออนที่ทำให้เกิดเจลในตัวทำละลาย การทำให้อัลจิเนตละลายได้จำเป็นต้องมีค่าพีเอชมากกว่าค่าวิกฤต ทำให้หมู่คาร์บอกซิลิกในโครงสร้างเกิดการ Deprotonated ได้ โดยค่าคงที่ในการแตกตัวของมอนอเมอร์ (pKa) Mannuronic acid และ Guluronic acid เท่ากับ 3.38 และ 3.65 ตามลำดับ อัลจิเนตสามารถละลายในตัวกลางน้ำที่มีสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เป็นกลาง การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงไอออนิกในสารละลายอัลจิเนตมีผลต่อการขยายของสายโซ่พอลิเมอร์ และความหนืดของสารละลาย โดยที่ความแข็งแรงไอออนิกสูงจะส่งผลให้ความสามารถในการละลายของอัลจิเนตจะลดลง อัลจิเนตอาจเกิดการตกตะกอนได้ด้วยเกลืออนินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง เช่น โพแทสเซียมคลอไรด์ นอกจากนี้อัลจิเนตสามารถเกิดเจลได้อย่างรวดเร็วกับสารที่มีประจุสองบวกเมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่มีค่ามากกว่า 6 เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  เป็นต้น โดยโครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg box) โดยมีประจุบวกเกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นในการละลายอัลจิเนตจำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายที่ปราศจากไอออนที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงกับอัลจิเนตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเกิดเจลของอัลจิเนตด้วย Multivalent cations ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของเจลที่ลักษณะคล้ายกล่องไข่ [23]

### 2.3.1.2 ความหนืด (Viscosity)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของอัลจิเนตกับค่าความเป็นกรด-เบส พบว่าความหนืดของอัลจิเนตในช่วงค่าพีเอชมากกว่า 5 จะมีความหนืดคงที่ ความหนืดของอัลจิเนตในช่วงค่าพีเอชต่ำกว่า 4.5 จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น และความหนืดของอัลจิเนตในช่วงค่าพีเอชเท่ากับ 3 จะเริ่มมีผลึกของกรดอัลจินิก นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของอัลจิเนตลดลง

### 2.3.1.3 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility)

อัลจิเนตสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษ Non-thrombogenic และ Non-immunogenic จึงได้รับการอนุมัติจากสำนักงานอาหารและยา (FDA) สำหรับใช้งานทางด้านทางการแพทย์ต่าง ๆ เช่น วัสดุปิดแผล วัสดุการพิมพ์ทันตกรรม เป็นต้น

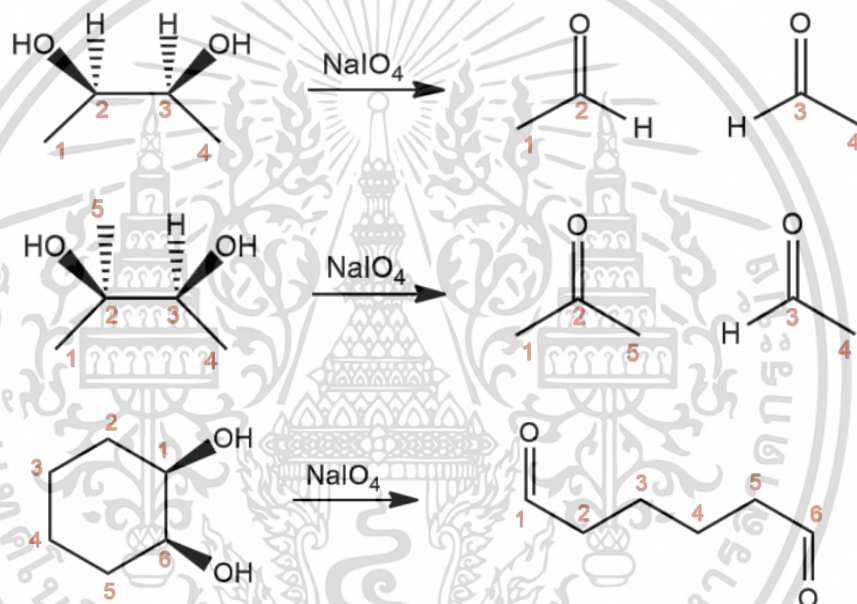
### 2.3.2 ออกซิไดซ์อัลจิเนต (Oxidized alginate)

ออกซิไดซ์อัลจิเนตเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมอัลจิเนต โดยใช้ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เช่น โซเดียมเพอร์ไอโอดेट ( $\text{NaIO}_4$ ) ทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในโครงสร้างของอัลจิเนต เกิดการแตกพันธะแล้วเปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ ทำให้ออกซิไดซ์อัลจิเนตมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการตัดสายโซ่บางส่วนส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลสั้นลงช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น [24] โดยการเตรียมออกซิไดซ์อัลจิเนตอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีชื่อว่า Oxidative cleavage reactions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.1 Oxidative cleavage reactions [25-26]

ปฏิกิริยา Oxidative cleavage เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารประกอบจำพวก 1,2 diol (Vicinal diol) สารประกอบแอลคีน (Alkene) และสารประกอบแอลไคน์ (Alkyne) กับรีเอเจนต์บางชนิดที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมเพอร์ไอโอดีต ( $\text{NaIO}_4$ ) โอโซน ( $\text{O}_3$ ) เป็นต้น โดยปฏิกิริยา Oxidative cleavage จะเกิดการแตกออกของพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนอะตอม (C-C bond) เกิดเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน (C-O bond) ในสารประกอบจำพวก 1,2 Diol เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมเพอร์ไอโอดีต พันธะ C-C จะเกิดการแตกออกแล้วเกิดเป็นพันธะ C-O ซึ่งสามารถเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ (Aldehyde) หรือคีโตน (Ketone) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ Diol เริ่มต้น แสดงดังรูปที่ 2.8

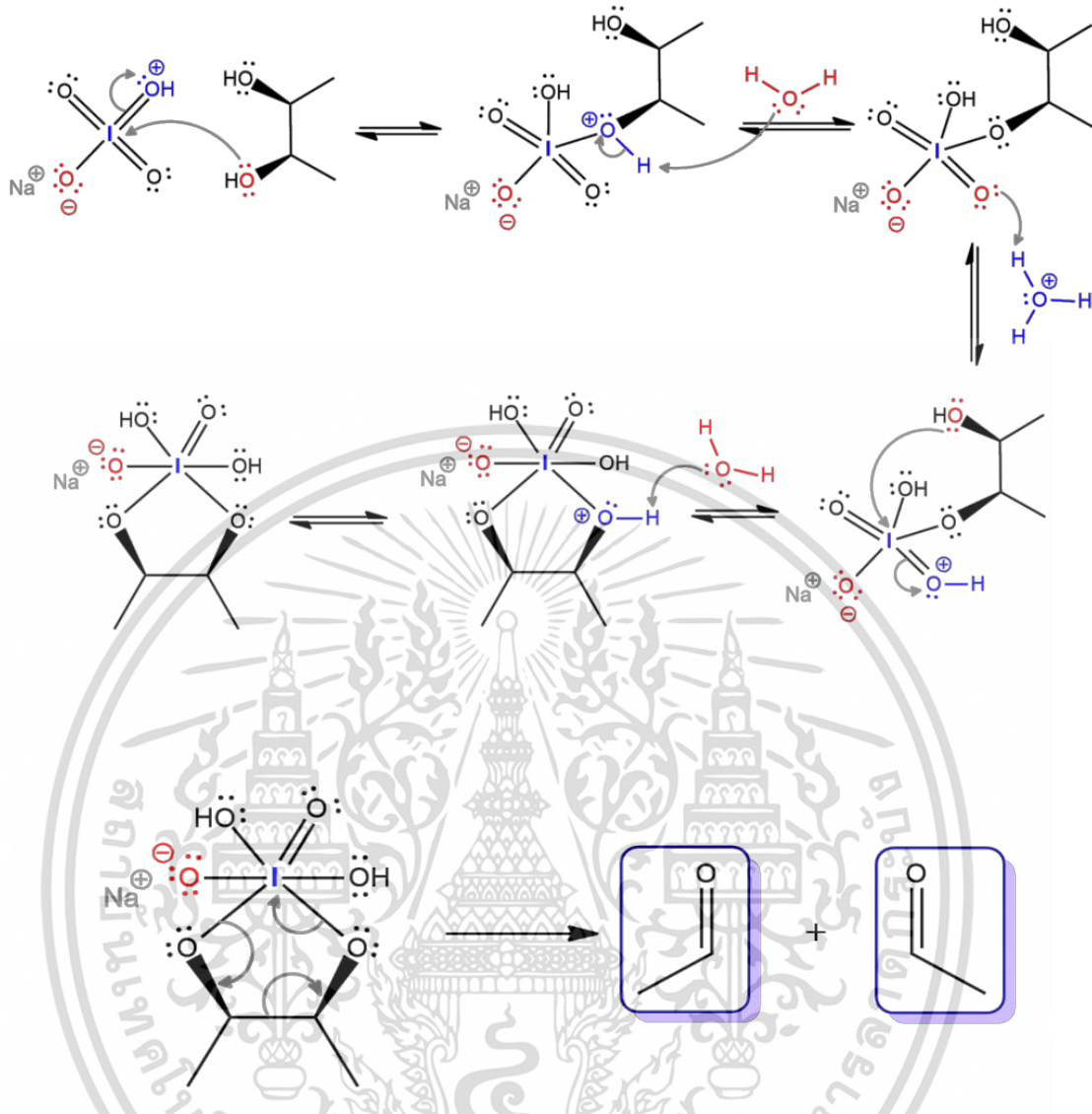


รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมเพอร์ไอโอดีตกับสารประกอบประเภท 1,2 Diol

ปฏิกิริยา Oxidative cleavage มีกลไกของปฏิกิริยาเริ่มจากออกซิเจนอะตอมของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของ Diol ซึ่งทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งไอโอดีตในโครงสร้างของโซเดียมเพอร์ไอโอดีตที่ถูกโปรตอน (Protonated sodium periodate) น้ำจะดึงโปรตอนเกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดขึ้นจะให้โปรตอนกับออกซิเจนที่เกิดพันธะคู่กับไอโอดีต จากนั้นหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนอะตอมนั้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งไอโอดีต และเกิดการกำจัดโปรตอน เกิดเป็นวงไอโอดีตเอสเทอร์ (Cyclic iodate ester) หลังจากนั้นวงไอโอดีตเอสเทอร์จะสลายตัวให้สารประกอบคาร์บอนิล (Carbonyl compounds) 2 ตำแหน่ง ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถผันกลับ

ได้ แสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

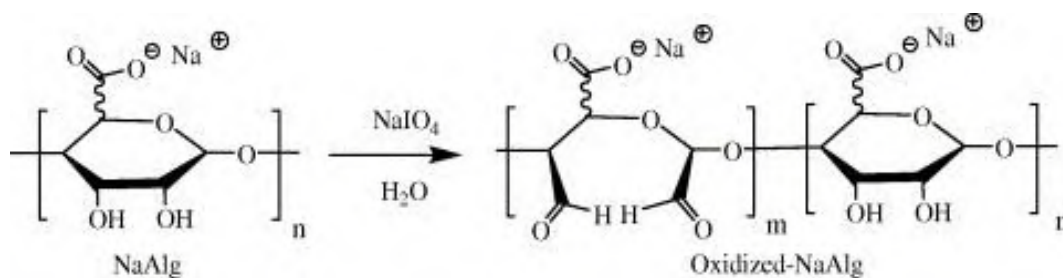


รูปที่ 2.9 กลไกปฏิกิริยา Oxidative cleavage

### 2.3.2.2 โครงสร้างของออกซีไดซ์อัลจิเนต

ออกซีไดซ์อัลจิเนตเกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate, SA) และสารออกซีไดซ์ เช่น โซเดียมเพอร์ไอโอดีต ( $\text{NaIO}_4$ ) โดยโซเดียมเพอร์ไอโอดีตเข้าทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต เกิดการแตกพันธะ C-C แล้วเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ 2 หมู่ แสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของออกซิไดซ์อัลจิเนต [24]

### 2.3.2.3 การนำออกซิไดซ์อัลจิเนตไปใช้ประโยชน์

จากโครงสร้างของออกซิไดซ์อัลจิเนตที่มีหมู่ฟังก์ชันของแอลดีไฮด์อยู่ในโครงสร้างทำให้ออกซิไดซ์อัลจิเนตมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้นเมื่อเทียบกับอัลจิเนต จึงมีการนำเอาออกซิไดซ์อัลจิเนตมาทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ เช่น ไคโตซาน คอลลาเจน เจลาติน [27] เป็นต้น โดยการนำออกซิไดซ์อัลจิเนตมาทำปฏิกิริยากับไคโตซานนั้นอาศัยการเกิดปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff-base reaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแอลดีไฮด์ของออกซิไดซ์อัลจิเนตกับหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) ในโครงสร้างของไคโตซานเกิดเป็นพันธะอิมีน (Imine) ได้ [28]

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของอัลจิเนต

#### 2.3.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยใช้เติมในอาหารกระป๋อง ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว สารเติมแต่งในอาหารแช่แข็ง และสารช่วยให้เกิดเจล เช่น การนำอัลจิเนตมาใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวในไอศกรีม เป็นต้น

#### 2.3.3.2 ด้านการแพทย์

มีการนำอัลจิเนตมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น การนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Engineering tissue) การขึ้นรูปเจลสำหรับวัสดุพิมพ์ทันตกรรม การทำแคปซูลปลดปล่อยยา และการทำวัสดุปิดแผล เป็นต้น

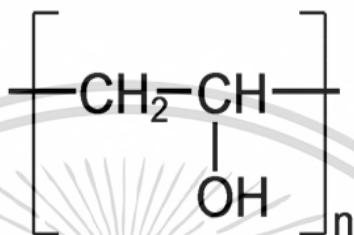
## 2.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) [29]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถละลายน้ำได้ และจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟินที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยแบคทีเรียในดิน เช่น Pseudomonads ทำให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติการก่อฟิล์มได้ดี มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงหรือเม็ด เตรียมได้โดยสังเคราะห์ขึ้นจากการดัดแปรโครงสร้างเอกซอสาร์เป็นเอกซอสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพอลิไวนิลอะซิเตต (Poly(vinyl acetate); PVAc) ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสภาวะกรดหรือด่าง

#### 2.4.1 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่อื่น ทำให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) ได้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [30]

#### 2.4.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [31]

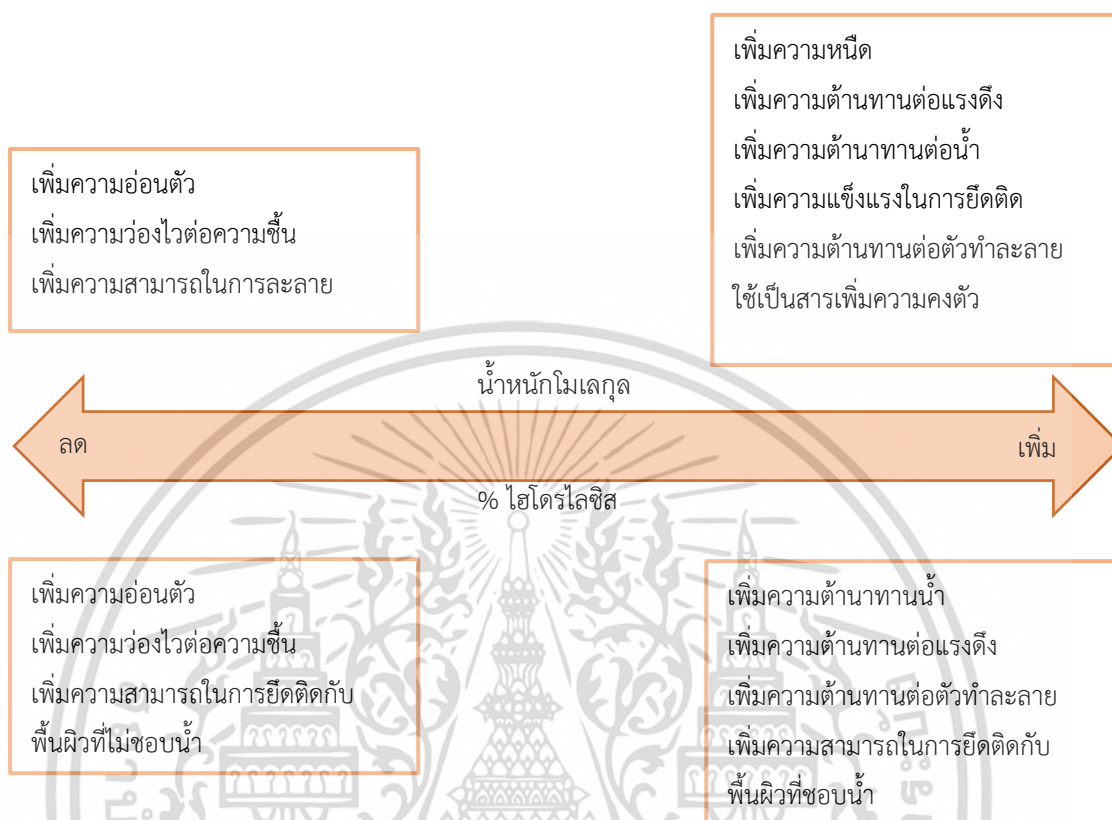
สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และระดับการไฮโดรไลซิส (Degree of hydrolysis) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสสูงจะมีความสามารถทนต่อแรงกระทำได้ดีกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสต่ำ เพราะพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสสูงมีความเป็นผลึกสูงกว่า เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้มากกว่า

นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังขึ้นกับความชื้นของสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นความสามารถในการทนต่อแรงดึงของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะลดลง แต่ความสามารถในการยืดตัวออกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายในน้ำได้ โดยละลายอย่างช้า ๆ ในน้ำเย็น แต่จะละลายเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และทั่วไปสามารถละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส นอกจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำแล้วยังขึ้นกับระดับการไฮโดรไลซิสของโมเลกุล โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อมีระดับการไฮโดรไลซิสประมาณร้อยละ 80 สำหรับผลของน้ำหนักโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลงแต่ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการดึงยึด ความสามารถในการอ่อนตัว และความสามารถต่อการฉีกขาดดีขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ส่วนความต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้เป็นอย่างดี และความสามารถนี้จะ

เพิ่มขึ้นตามระดับการไฮโดรไลซิสที่สูงขึ้น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(มีระดับการไฮโดรไลซิสสูง) จะไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน เอสเตอร์ และคีโตน เนื่องจากสภาพขั้วที่แตกต่างกันแต่จะละลายได้ใน เอทิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล เป็นต้น



รูปที่ 2.12 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส

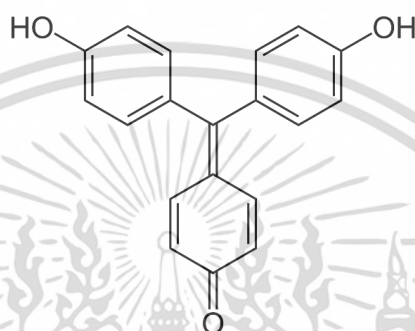
#### 2.4.3 การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยอาศัยสมบัติการละลายน้ำ เช่น ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive) สำหรับกระดาษ และไม้ ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และระบบแขวนลอยต่าง ๆ มีความคงตัว ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความเหนียวใส และทนต่อการขีดข่วน

การใช้งานเมื่อนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้ละลายน้ำแต่สามารถดูดน้ำ และความชื้นได้เป็นอย่างดี นำมาใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สวมใส่สบาย ทนทานต่อการสีกรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี นิยมใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 50,000-100,000 และระดับการไฮโดรไลซิส 98-99 เปอร์เซ็นต์

## 2.5 สีย้อมออริน [32]

สีย้อมออริน มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กรดโรโซลิก (Rosolic acid) หรือ คอร์ลลิน (corallin) เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะทางกายภาพเป็นผลึกของแข็งสีแดง มีสูตรโมเลกุลเป็น  $C_{19}H_{14}O_3$  สามารถละลายได้ในน้ำ และละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ ซึ่งสีย้อมออรินสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้เมื่อค่าพีเอชเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในช่วงพีเอชเป็นกรด และสีแดงที่ค่าพีเอชเป็นเบส จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ค่าพีเอชได้



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสีย้อมออริน [32]

ชื่อ IUPAC : 4-[Bis(4-hydroxyphenyl)methylene]- 2,5-cyclohexadienone

น้ำหนักโมเลกุล : 290.32 g/mole

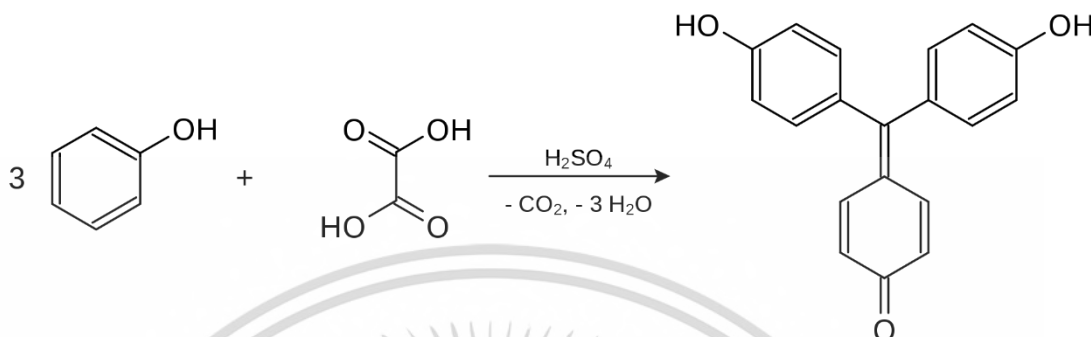
ตารางที่ 2.1 สมบัติบางประการของสีย้อมออริน

สมบัติ	สีย้อมออริน
ความหนาแน่น	1.2497 g/ml
จุดหลอมเหลว	309 °C
จุดเดือด	372.4 °C
ดัชนีหักเห	1.42
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ดีในเอทานอล
ดัชนีสี	43800
pKa	6.98 (25 °C)
ช่วงพีเอช	5.0 (เหลือง) – 6.8 (แดง)
ความยาวคลื่น	534.6 nm, 479.5nm, 482nm
สภาพการจัดเก็บ	เก็บที่อุณหภูมิห้อง
สิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยง	วัสดุที่เข้ากันไม่ได้ ตัวออกซิไดซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การเตรียมสี้อมออริน

สี้อมออรินสามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล (Phenol) และกรดออกซาลิก (Oxalic acid) ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สมการปฏิกิริยาการเตรียมสี้อมออริน [32]

### 2.5.2 ความปลอดภัย

อันตรายที่มีผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นจากสี้อมออริน มีดังนี้

ตา : ก่อให้เกิดการระคายเคืองตา

ผิวหนัง : ระคายเคืองต่อผิวหนังปานกลาง หากเกิดการสัมผัสผิวหนังซ้ำหลายครั้งจะทำให้เกิดการทำลายผิวหนังหรือเกิดอาการผิวหนังอักเสบของผิวหนังเฉพาะจุด

การรับประทาน : เป็นอันตรายหากรับประทาน จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร และเกิดอาการท้องร่วง

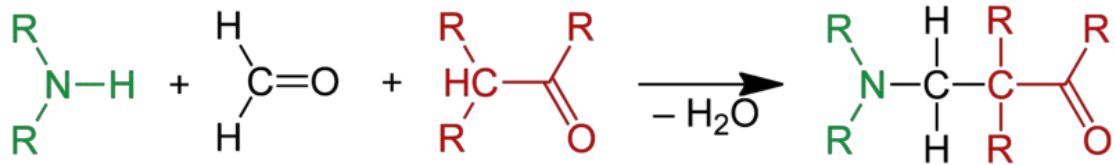
การสูดดม : เป็นอันตรายหากสูดดม จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ หากสูดดมเป็นเวลานานอาจทำให้ปอดเสียหาย

## 2.6 ปฏิกิริยาแมนนิช (Mannich reaction) [33-34]

ปฏิกิริยาแมนนิชเป็นปฏิกิริยาอินทรีย์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเติมนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophilic addition) ของเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ (Primary or secondary amine) ไปยังหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์แล้วเกิดการขจัดน้ำออกเกิดเป็นสารประกอบอิมีน (Imine) หรืออิมิเนียมไอออน (Iminium ion) หลังจากนั้นอิมิเนียมไอออนที่เป็นนิวคลีโอไฟล์เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีโปรตอน (Acidic proton) อยู่ถัดจากหมู่คาร์บอนิลหรือกรดคาร์บอน (Carbon acid) เกิดเป็นสารประกอบเบต้าอะมิโนคาร์บอนิล ( $\beta$ -amino-carbonyl compound) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mannich base ปฏิกิริยาแมนนิชจัดเป็นปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction)

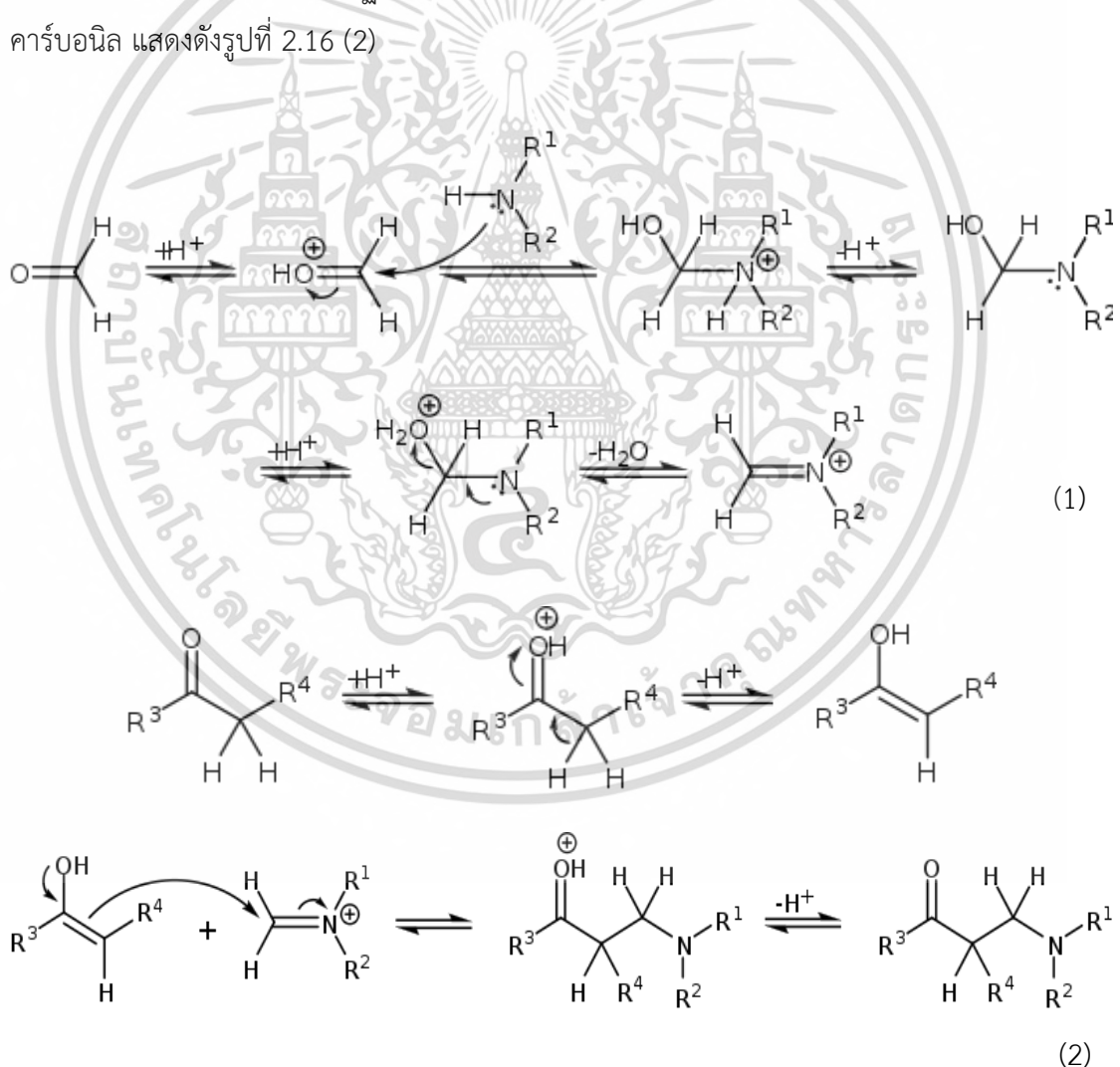
ปฏิกิริยาแมนนิชแสดงดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 สมการปฏิกิริยาแมนนิช [33]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาแมนนิชระหว่างหมู่ฟังก์ชันเอมีน และสารประกอบที่มีโปรตอน (Acidic proton) ที่อยู่ถัดจากหมู่คาร์บอนิลหรือกรดคาร์บอน เริ่มจากกระบวนการเกิดอิมิเนียมไอออน โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันเอมีน และฟอร์มัลดีไฮด์ แสดงดังรูปที่ 2.16 (1) จากนั้นสารประกอบคาร์บอนิล เช่น คีโตน สามารถเกิด Tautomerize ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างในรูปของอินอล (Enol form) แล้วทำปฏิกิริยากับอิมิเนียมไอออน เกิดเป็น สารประกอบเบต้าอะมิโนคาร์บอนิล แสดงดังรูปที่ 2.16 (2)



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาแมนนิช [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาแมนนิชเมื่อเกิดอิมิเนียมไอออนจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันเอมีน และฟอร์มาลดีไฮด์ อิมิเนียมไอออนยังสามารถทำปฏิกิริยากับนิวคลีโอไฟล์อื่น ๆ นอกเหนือจากการทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอนิลหรือกรดคาร์บอน เช่น สารประกอบไนโตรล์ อะลิฟาติกไนโตรฟีนิล ไพรีดีน พูแรน เป็นต้น

นอกจากนี้มีการนำปฏิกิริยาแมนนิชมาใช้ประโยชน์ในการต่อกิ่งสีย้อมเข้ากับพอลิเมอร์ โดยสีย้อมที่สามารถนำมาใช้ในปฏิกิริยาแมนนิชจำเป็นต้องมีตำแหน่งออร์โธ (Ortho position) ในโครงสร้าง โดยมีงานวิจัยที่ใช้ปฏิกิริยาแมนนิชในการต่อกิ่งสีย้อมฟีนอล์ฟทาซีนเข้ากับเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์ [9] และการต่อกิ่งสีย้อมฟีนอล์ฟทาซีนเข้ากับโครงสร้างของโคโคซาน [10]

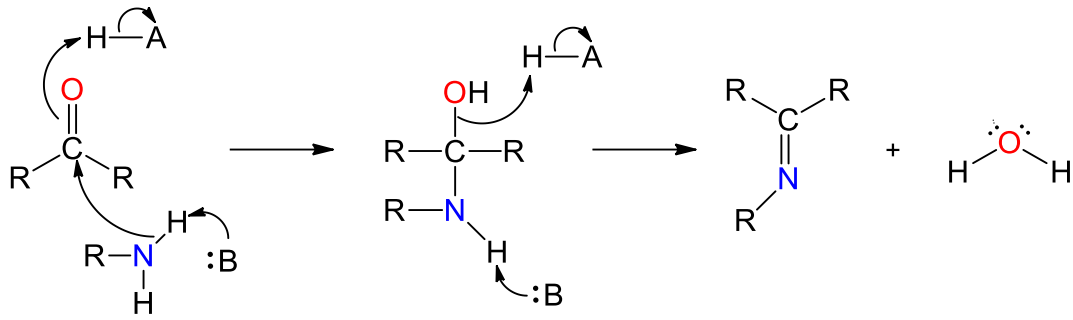
## 2.7 ปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff-base reaction) [35-36]

ปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff-base) หรือปฏิกิริยาการสร้างพันธะอิมิน (Imine formation) เกิดจากนิวคลีโอไฟล์ของสารประกอบเอมีนเข้าทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งอิเล็กโตรไฟล์ (Electrophilic carbon) ของสารประกอบแอลดีไฮด์หรือสารประกอบคีโตนเกิดเป็นสารประกอบอิมิน ซึ่งมีการขจัดน้ำออก ดังรูปที่ 2.17



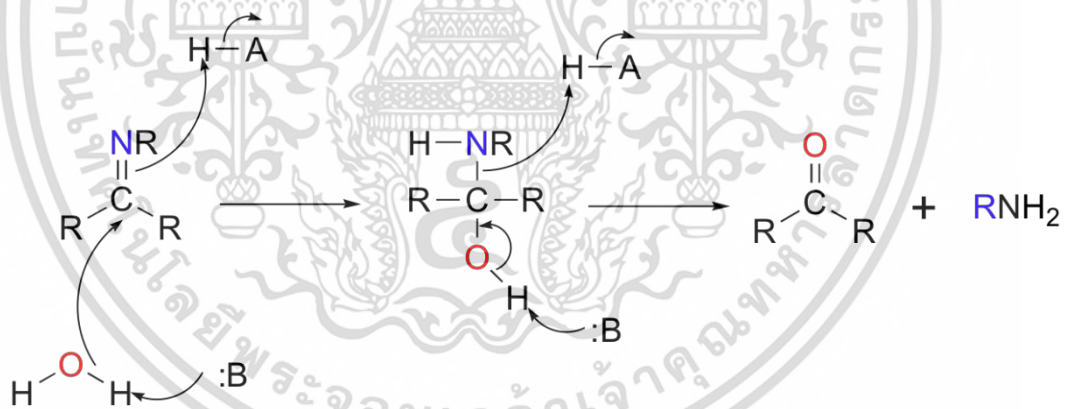
รูปที่ 2.17 สมการปฏิกิริยาชิฟเบส [35]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาชิฟเบสเริ่มจากไนโตรเจนอะตอมของเอมีนซึ่งทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมของหมู่คาร์บอนิล โดยโปรตอนจากกรดเข้ามาทำให้หมู่คาร์บอนิลมีสภาพขาดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น แล้วให้เกิดเป็นคาร์บินอลเอมีน (Carbinolamine) คือ คาร์บอนอะตอมที่มีหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่เอมีนอยู่ด้วยกัน จากนั้นไนโตรเจนที่อยู่กับหมู่คาร์บอนิลจะผลักให้ออกซิเจนอะตอมหลุดออก และให้อิเล็กตรอนแก่คาร์บอนอะตอมเกิดเป็นพันธะ C=N เรียกว่า พันธะอิมิน (Imine bond) แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กลไกปฏิกิริยาซิปเบส [36]

ปฏิกิริยาซิปเบสเหมาะสำหรับการสังเคราะห์ในสภาวะกรด เนื่องจากโปรตอนจากกรดทำให้หมู่คาร์บอนิลของสารประกอบแอลดีไฮด์และคีโตนมีสภาพขาดอิเล็กตรอนมากขึ้น (ประจุบวกสูงขึ้น) จึงว่องไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของนิวคลีโอไฟล์ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาซิปเบสสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของอิมิน คือ การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ทำลายพันธะอิมิน เกิดเป็นสารประกอบแอลดีไฮด์หรือคีโตนและสารประกอบเอมีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ปฏิกิริยาย้อนกลับของอิมินมีกลไก แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กลไกปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yamamori, N. และคณะ (2003) [19] ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุพันธ์ไคโตซานที่สามารถละลายน้ำได้โดยการใช้ปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิลในการตัดแปรรังโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานด้วยกรดอะคริลิกได้เป็นอนุพันธ์ไคโตซานที่มีชื่อว่าคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน ซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำกลั่น มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าไคโตซาน ความสามารถในการละลายน้ำของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานขึ้นกับองค์การแทนที่

Gomez, C.G. และคณะ (2006) [24] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินेटโดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโซเดียมอัลจินेटด้วยโซเดียมเพอร์ไอโอดีต ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ของโซเดียมอัลจินेटเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมเพอร์ไอโอดีต และเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าการออกซิไดซ์เพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ออกซิไดซ์อัลจินेटลดลง เมื่อนำมาทดสอบการเกิดเจลพบว่าที่เปอร์เซ็นต์โมลการออกซิเดชันมากกว่า 10 ไม่สามารถเกิดเจลได้ถึงแม้ว่าจะใช้แคลเซียมไอออนในการเชื่อมโยงมากเกินไปเป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความแข็ง (Stiffness) ลดลง และเมื่อเกิดการออกซิเดชันมากส่งผลให้การทำงานร่วมกันระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตในโครงสร้างของออกซิไดซ์อัลจินेट และไอออนที่ใช้ในการเชื่อมโยงลดลง

Zhang, L. และคณะ (2009) [9] ได้ศึกษาการสังเคราะห์การตอกกิ่งสีย้อมฟีนอล์ฟทาไลน์บนเส้นใยพอลิอะครีลาไมด์ผ่านปฏิกิริยาแมนนิช โดยเส้นใยพอลิอะครีลาไมด์ที่ตอกกิ่งสีย้อมฟีนอล์ฟทาไลน์ เปลี่ยนสีจากสีเหลืองจางไปเป็นสีม่วง เส้นใยมีการตอบสนองในช่วงเบสที่กว้าง จากการแช่เส้นใยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เส้นใยเกิดการตอบสนองได้รวดเร็วภายในเวลา 1 วินาทีเปลี่ยนเป็นสีม่วงได้ทันที เหมาะสำหรับใช้ในการอุดรอยรั่วของสารอัลคาไลน์ที่มีความรุนแรง

Ren, J. และคณะ (2019) [37] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มซ่อมแซมตนเองที่เชื่อมโยง 2 ระบบจากไคโตซาน ไดแอลดีไฮด์สตาร์ช และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้สำหรับการแยกก๊าซ การเชื่อมโยง 2 ระบบที่เกิดขึ้น เกิดจากพันธะไฮโดรเจน และการเกิดปฏิกิริยาชิฟเบสระหว่างไคซาน และไดแอลดีไฮด์สตาร์ช เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์พบว่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หมู่อะมิโนในโครงสร้างของไคโตซานช่วยในเรื่องการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถประยุกต์ใช้ฟิล์มเพื่อแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

Dwi, R. และ Cuk, I. (2018) [38] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มไคโตซานผสมกับสารสกัดจากข้าวโพดเพื่อใช้เป็นฟิล์มที่ตอบสนองต่อเวลา และอุณหภูมิ สารสกัดจากข้าวโพดมีองค์ประกอบของแอนโทไซยานินซึ่งเป็นสีย้อมที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไป เมื่อนำสารสกัดจากข้าวโพดมาทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 2.0-13.0 ที่พีเอช 2.0 และ 3.0 ได้สีเอกสารนี้ม่วงแดงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร พีเอช 4.0-7.0 ได้สีม่วงและเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นสารละลายไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวจนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองที่พีเอชเท่ากับ 12 เมื่อนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง สีของฟิล์มเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีน้ำเงิน และฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลืองเมื่อเวลาผ่านไป 360 ชั่วโมง

Pereira Jr., V.A. และคณะ (2015) [7] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากโคโตซาน และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับสีย้อมแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีม่วงเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่อโคโตซานเท่ากับ 3:7 ผสมร่วมกับแอนโทไซยานิน และโซเดียมไตรพอสเฟตที่ช่วยในการเชื่อมโยง พบว่าการบวมตัวของฟิล์มที่เตรียมได้ในน้ำกลั่นเท่ากับ 38 เปอร์เซ็นต์ และทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชเมื่อแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 1.0-12.0 พบว่าฟิล์มที่ได้มีสีแดงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 1.0-4.0 และเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้เปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียว โดยฟิล์มที่เตรียมได้นำมาทดสอบคุณภาพของนมพบว่าฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อนมเกิดการเน่าเสีย เนื่องจากนมที่เกิดการเน่าเสียจะมีค่าพีเอชประมาณ 4.6 จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์นมเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของนมได้

Liang, T. และ Wang, L. (2017) [39] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจากพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามผสมกับสารสกัดจากต้นลิ้นจี่เพื่อใช้เป็นอินดิเคเตอร์ โดยพอลิแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามมีองค์ประกอบของกลูโคส ไซโลส และกาแลคโตส เป็นอัตราส่วนเท่ากับ 2.8:2.25:1 ซึ่งจะผสมเข้ากับสารสกัดจากต้นลิ้นจี่ซึ่งเป็นสีย้อมจากธรรมชาติตั้งแต่ 0-25% เมื่อปริมาณสีย้อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงจาก 30.20 MPa เป็น 29.97 MPa ในขณะที่การซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น และสีของฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน ในช่วงพีเอชเท่ากับ 4.0-10.0 จากเทคนิค FT-IR แสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์แต่เมื่อเติมสีย้อมทำให้แรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง และการทดสอบการเน่าเสียของนมเพื่อแสดงถึงฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชสามารถตรวจวัดการเน่าเสียของนมได้ ฟิล์มที่ได้สามารถตอบสนองต่อค่าพีเอชได้ดีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อตรวจสอบคุณภาพความสดใหม่ของอาหารได้

Choi, I. และคณะ (2017) [13] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากอาการ์ และแป้งมันสำปะหลังผสมกับสีย้อมแอนโทไซยานินเพื่อใช้เป็นฟิล์มพีเอชอินดิเคเตอร์ เมื่อทดสอบการเปลี่ยนสีของฟิล์มพีเอชอินดิเคเตอร์ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 2.0-10.0 ในช่วงพีเอชเป็นกรดฟิล์มที่ได้มีสีแดงและจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวในช่วงพีเอชเป็นเบส เมื่อนำมาทดสอบการเน่าเสียของเนื้อหมู โดยที่เนื้อหมูที่สดใหม่จะมีค่าพีเอชอยู่ที่ 5.18-6.28 และเนื้อหมูที่เน่าเสียมีค่าพีเอชอยู่ที่ 7.42 ในการทดสอบใช้เนื้อหมู 10 กรัมเก็บในงานเพาะเชื้อพร้อมกับฟิล์มพีเอชอินดิเคเตอร์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สีของฟิล์มพีเอชอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำตาล ฟิล์มพีเอชอินดิเคเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อตรวจสอบคุณภาพความสดใหม่ของอาหารได้

Pacquit, A. และคณะ (2007) [40] ได้ศึกษาการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อการตรวจสอบการเน่าเสียของปลา โดยการเตรียมฟิล์มจากเซลลูโลสอะซิเตตผสมกับสีย้อมโบรโมครีซอลกรีนด้วยเทคนิคไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

spincoating พิล์มที่เตรียมได้ใช้ในตรวจวัดความเป็นกรด-เบสจากสารระเหยจากปลาเมื่อเกิดการเน่าเสีย ซึ่งเป็นสารระเหยประเภทเอมีน พิล์มจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีฟ้า เมื่อทำการทดสอบการหลุดออกของสีย้อมพบว่าการหลุดออกของเกลือแอมโมเนียมโบรไมด์ในโครงสร้างของสีย้อมโบรโมคริสซอลกรีน อย่างไรก็ตามพิล์มที่ใช้ทดสอบการเน่าเสียของปลาเป็นการวัดสารระเหยไม่ได้สัมผัสกับเนื้อปลาโดยตรงจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน และเปรียบเทียบผลความหนาของพิล์มพบว่า พิล์มที่มีความหนาน้อยที่สุดมีความสามารถในการตรวจสอบดีที่สุด เนื่องจากมีการเปลี่ยนสีที่ชัดที่สุด โดยพิล์มจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าภายในเวลาประมาณ 20-38 ชั่วโมง

Zepon K.M. และคณะ (2019) [41] ได้ศึกษาการพัฒนาแผ่นปิดแผลจากคาร์ราจีแนน (kC) และโลคัสปีนกันัม (LBG) ผสมกับสีย้อมจากสารสกัดจากแครนเบอร์รี่ (CB) เพื่อเป็นตัวตรวจสอบการติดเชื้อของแบคทีเรีย โดยการเตรียมพิล์มไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและโลคัสปีนกันัมผสมกับสีย้อมจากสารสกัดจากแครนเบอร์รี่ (kC:LBG:CB) จากเทคนิค SEM พบว่าพิล์มไฮโดรเจลที่ไม่ได้มีการเติมสีย้อมมีพื้นผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อเติมสีย้อมเข้าไปจะทำให้พิล์มไฮโดรเจลมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งพิล์มไฮโดรเจลสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 5.0-9.0 และสามารถตอบสนองต่อค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ดี โดยพิล์มไฮโดรเจลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีแดงเป็นสีน้ำตาล และยังป้องกันการยึดติดของแบคทีเรียบนผิวของพิล์มไฮโดรเจลได้ เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นปิดแผลที่ใช้ในการตรวจสอบการติดเชื้อแบคทีเรีย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเตรียมพิล์มจากโคโคซาน แป้ง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับสีย้อมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อตรวจสอบคุณภาพ และความสดใหม่ของอาหาร ในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมพิล์มจากคาร์บอกซีเอทิลโคโคซาน (CECS) ซึ่งเป็นอนุพันธ์โคโคซานที่ละลายน้ำได้ ร่วมกับออกซิไดซ์อัลจินต และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยทำการต่อกิ่งสีย้อมออร์อินบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโคซานผ่านปฏิกิริยาแมนนิช ทำการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว การตอบสนองต่อค่าพีเอชของพิล์ม และการทดสอบการประยุกต์ใช้พิล์มกับตัวอย่างอาหาร สำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถตรวจสอบคุณภาพอาหารได้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
- 2) แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 3) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 4) ซ้อนตักสาร
- 5) ที่คีบ (Forceps)
- 6) ขาตั้ง และ ตัวจับยึด
- 7) จานเพาะเชื้อพลาสติก (Plastic petri dish)
- 8) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 9) ชุดกรองแบบลดความดัน
- 10) กระจกชั่งเบอห์ 1 และ 41
- 11) ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator) จาก Merck Millipore Ltd.
- 12) กระจกชั่งลิทมัส (Litmas paper) จาก Precision Laboratories Ltd.
- 13) พีเอชมิเตอร์ (pH-meter) รุ่น pH700 (Eutech instrument)
- 14) Hot plate และ Magnetic stirrer รุ่น HS-7 (IKA)
- 15) Hot plate และ Magnetic stirrer รุ่น MSH-20D (WiseStir)
- 16) ไมโครปิเปต (Micropipette)
- 17) ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)
- 18) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น MS-TS (Mettler Toledo)
- 19) ตู้อบ (Oven) รุ่น UF110 (Memmert)
- 20) เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (NMR) รุ่น Advance III HD (Bruker) ความถี่ 500 MHz
- 21) เครื่อง Elemental analyzer รุ่น FLASH 2000 (FlashSmart Elemental analyzer)
- 22) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR5K จาก Lloyd-Instruments Co.,Ltd.
- 23) เครื่อง UV-vis spectrophotometer รุ่น Blue Star B จาก Lab Tech Co.,Ltd.
- 24) เครื่องวัดเฉดสี (colorimeter) รุ่น HunterLab MiniScan XE Plus จาก Hunter Associates Laboratory, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สารเคมี

- 1) ไคโตซาน (Chitosan) เกรดวิเคราะห์ Eland International (Thailand) Co., Ltd
- 2) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เกรดการค้า NL-05, Nippon Gohsei Osaka Japan

ตารางที่ 3.1 เกรดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

Grade	Viscosity 4% 20°C (mPa.s)	Degree of hydrolysis (Mol %)
NL-05	4.6-6	99.0-100

- 3) โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate, SA) น้ำหนักโมเลกุล 1,296,172 Daltons เกรดวิเคราะห์ Acros Organics Co., Ltd
- 4) กรดอะคริลิก (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) เกรดวิเคราะห์ Acros Organics Co., Ltd.
- 5) โซเดียมเมตาเพอริโอเดต (NaIO<sub>4</sub>) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 6) เอทิลีนไกลคอล (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 7) ฟอรัมาลดีไฮด์ (CH<sub>2</sub>O) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 8) สีย้อมออริจัน (C<sub>19</sub>H<sub>14</sub>O<sub>3</sub>) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 9) ฟีนอล์ฟทาลีน เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 10) เมทิลออเรนจ์ (C<sub>14</sub>H<sub>14</sub>N<sub>3</sub>NaO<sub>3</sub>S, MO) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 11) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 12) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 13) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 14) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 15) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 16) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 17) บอแรกซ์ เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 18) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 19) ไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ (NH<sub>2</sub>OH.HCl) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 20) เอทานอล (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents และเกรดการค้า Zen point Co., Ltd.
- 21) ไอโซโพรพานอล ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHOH) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Co., Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 22) ไดมethylฟอร์มาไมด์ ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NC(O)H) เกรดวิเคราะห์ จาก Carlo Erba Reagents Co., Ltd.
- 23) น้ำกลั่น (Distilled water)

### 3.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 7 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเตรียมสารเคมี
2. การสังเคราะห์ออกซีไดซ์อัลจินต
3. การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานโดยวิธีการเติมแบบไมเคิล (Micheal addition reaction)
4. การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน โดยปฏิกิริยาแมนนิช (Mannich reaction)
5. การเตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช
6. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุพันธ์โคโตซาน
7. การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของฟิล์ม

#### 3.3.1 การเตรียมสารเคมี

##### 3.3.1.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซิงโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 และ 4 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร คนจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่น ปิดฝาแล้วเขย่า จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลาร์ตามลำดับ

ซิงโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดปริมาตรที่ 100 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่าเพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

##### 3.3.1.2 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก 4.165 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดปริมาตรที่ 500 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่าเพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.3.1.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลตความเข้มข้น

#### 0.1 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 2.0423 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป คนจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นจนครบ 100 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า

### 3.3.1.4 การเตรียมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนความเข้มข้น 0.05% โดยมวลต่อปริมาตร

ชั่งฟีนอล์ฟทาลีน 0.025 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปอีก 25 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.3.1.5 การเตรียมสารละลายเมทิลออเรนจ์ความเข้มข้น 0.05% โดยมวลต่อปริมาตร

ชั่งเมทิลออเรนจ์ 0.025 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 40 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.3.1.6 การเตรียมสารละลายไฮดรอกซีลามีไฮโดรคลอไรด์ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล

ชั่งไฮดรอกซีลามีไฮโดรคลอไรด์ 17.50 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 150 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 1000 มิลลิลิตร

### 3.3.1.7 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 6.80 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร คนจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 250 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า

### 3.3.1.8 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.05 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร คนจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 250 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.9 การเตรียมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.05 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไบคาร์บอเนต 3.73 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร คนจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 250 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า

### 3.3.1.10 การเตรียมสารละลายบอแรกซ์ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์

ชั่งบอแรกซ์ 2.38 กรัม ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไป 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 250 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า

### 3.3.1.11 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

บัฟเฟอร์พีเอช 4 เตรียมโดยการชั่งกรดซิตริก 10.50 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.30 กรัม และกรดไฮโดรคลอริก 0.98 กรัม เติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร แล้วเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 500 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า

บัฟเฟอร์พีเอช 5-13 เตรียมโดยการนำสารละลายที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.3.1.1 - 3.3.1.3 และ 3.3.1.7 - 3.3.1.10 ผสมเข้าด้วยกันให้ได้สัดส่วนตามตารางที่ 3.2 จากนั้นปรับปริมาตรของสารละลายโดยเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบ 200 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.2 ปริมาตรของสารละลายที่ใช้สำหรับเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

พีเอช	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)							
	0.1 M NaOH	0.2 M NaOH	0.1 M KHP	0.2 M KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.2 M KCl	0.1 M HCl	0.05 M NaHCO <sub>3</sub>	0.025 M Borax
5	45.20		100.00					
6		5.70		50.00				
7	58.20			100.00				
8		46.80		50.00				
9						9.20		100.00
10	21.40						100.00	
11	45.40						100.00	
12		12.00			50.00			
13		132.00			50.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัพเฟอร์พีเอช 14 เตรียมโดยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้ว  
ปรับปริมาตรจนครบ 100 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร

### 3.3.1.12 การละลายโซเดียมอัลจิเนต

ชั่งโซเดียมอัลจิเนต 2 กรัม ลงในบีกเกอร์ ตามด้วยน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นจน  
ที่ 350 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้สารละลายโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 1% โดยมวล  
ต่อปริมาตร

### 3.3.1.13 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด NL-05 ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 1 และ 2 % โดยมวล  
ต่อปริมาตร โดยชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 1 และ 2 กรัม ตามลำดับ โดยค่อย ๆ เติมพอลิไวนิล  
แอลกอฮอล์ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส  
และปั่นจนที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที จนกระทั่งสารละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน

## 3.3.2 การสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจิเนต

นำสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (SA) ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.3.1.12 มาเติมโซเดียม  
เมตาเพริโอเดต ( $\text{NaIO}_4$ ) 2.2 กรัม แล้วปั่นจนที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง  
และทำปฏิกิริยาในที่มืด เมื่อครบเวลา 6 ชั่วโมง เติมเอทิลีนไกลคอล 3 มิลลิลิตร แล้วปั่นจนอย่าง  
ต่อเนื่องที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อหยุดปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นนำสารที่  
สังเคราะห์ได้มาผ่านกระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis) ด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นนำ  
สารที่ได้จากการไดอะไลซิสมาตกตะกอนในเอทานอล 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำตะกอนมากรองแบบ  
ลดความดัน และล้างตะกอนด้วยเอทานอลจนกระทั่งตะกอนไม่จับกันเป็นก้อน แล้วนำตะกอนไปอบที่  
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้มาชั่งน้ำหนักและคำนวณ  
ผลผลิตร้อยละ (% Yield) ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{ผลผลิตร้อยละ (\% Yield)} = \frac{\text{น้ำหนักที่ชั่งได้จริง}}{\text{น้ำหนักตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (3.1)$$

## 3.3.3 การหาปริมาณแอลดีไฮด์ในโครงสร้างออกซิไดซ์อัลจิเนต [61]

นำสารละลายเมทิลออเรนจ์ความเข้มข้น 0.05% โดยมวลต่อปริมาตร 100 ไมโครลิตรเติม  
ลงในสารละลายไฮดรอกซีลามีโนไฮโดรคลอไรด์ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล 25 มิลลิลิตร ปั่นจนให้  
เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที ชั่งออกซิไดซ์อัลจิเนต 0.1 กรัม เติมลงในสารละลายผสมข้างต้น ปั่นจนจน  
สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็น ใบใส่ประโยชน์ต้นการคิด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (เทคนิค 2 ตำแหน่ง) ทำซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาปริมาณหมู่แอลดีไฮด์ในออกซีไดซ์อัลจินต์ได้จากสมการที่ (3.2)

$$\text{ปริมาณหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ (mmol/g)} = \frac{C_{\text{NaOH}} \text{ (M)} \times V_{\text{NaOH}} \text{ (mL)}}{W_s \text{ (g)}} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $C_{\text{NaOH}}$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)

$V_{\text{NaOH}}$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (mL)

$W_s$  = น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)

### 3.3.4 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานโดยวิธีการเติมแบบไม่เคิล

ซึ่งโคโตซาน 6 กรัมลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วเติมกรดอะคริลิก (Acrylic acid; AA) 4.657 กรัม ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาปรับพีเอชของสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตร จนได้พีเอชของสารเท่ากับ 10 จากนั้นนำสารที่ได้มาผ่านกระบวนไดอะไลซิสด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นนำสารที่ได้จากการไดอะไลซิสไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dry) เป็นเวลา 96 ชั่วโมง นำสารที่ได้มาชั่งน้ำหนัก และคำนวณผลผลิตร้อยละดังสมการที่ (3.1)

### 3.3.5 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน (CECS-g-RA) โดยปฏิกิริยาแมนนิช

บีกเกอร์ที่ 1 เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน (CECS) ที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอน 3.3.3 โดยชั่งคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้สารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน จากนั้นให้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

บีกเกอร์ที่ 2 ชั่งสีย้อมออริน 0.534 กรัม ละลายในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารในบีกเกอร์ที่ 2 ลงในบีกเกอร์ที่ 1 พร้อมให้อุณหภูมิอย่างต่อเนื่องที่ 60 องศาเซลเซียส ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที

ซึ่งฟอร์มัลดีไฮด์ 0.03 กรัม เติมน้ำกลั่นในสารละลาย พร้อมให้อุณหภูมิและปั่นกวนอย่างรุนแรงต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างหมู่อะมิโนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อฟอร์มัลดีไฮด์ต่อสีย้อมออริน ( $\text{NH}_2$  : HCHO : Dye) เท่ากับ 1:0.1:0.5

เมื่อครบเวลานำสารที่สังเคราะห์ได้มาตกตะกอนในไอโซโพรพานอล 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำตะกอนที่ได้มากรองแบบลดความดันแล้วล้างตะกอนด้วยไอโซโพรพานอล จนสารละลาย

ด้านล่างใสไม่มีสี ขั้นตอนนี้จะล้างสีย้อมที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกไปได้ จากนั้นนำตะกอนที่ได้มาละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปผ่านกระบวนการไดอะไลซิสด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นนำสารที่ได้จากการไดอะไลซิสไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 96 ชั่วโมง นำสารที่ได้มาชั่งน้ำหนัก

### 3.3.6 การเตรียมฟิล์ม

1. เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก โดยชั่งคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที
2. เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกึ่งด้วยสีย้อมออริโนความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก โดยชั่งคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกึ่งด้วยสีย้อมออริโน 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที
3. เตรียมสารละลายออกซีไดซ์อัลจินตความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก โดยชั่งออกซีไดซ์อัลจินต 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที
4. ผสมสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน และสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกึ่งด้วยสีย้อมออริโนในสัดส่วนโดยปริมาตรเป็น 6:4 5:5 และ 4:6
5. นำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 1 หรือ 2% โดยมวลต่อปริมาตร จากข้อที่ 3.3.1.13 มา 10 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายผสมของสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน และสารละลายคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกึ่งด้วยสีย้อมออริโน 10 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที
6. เติมสารละลายออกซีไดซ์อัลจินต 5 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
7. เทสารละลายผสมที่ได้ 20 กรัม ลงในงานเพาะเชื้อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 เซนติเมตร
8. อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง เพื่อให้ฟิล์มแห้ง
9. นำฟิล์มที่ได้ออกจากงานเพาะเชื้อแล้ววัดความหนาของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ชื่อสูตรและสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์ม

สูตร	ปริมาตรที่ใช้ (ml)				
	2%CECS	2%CECS-g-RA	2%PVA	1%PVA	1%OSA
CR64P2A	6.00	4.00	10.00	-	5.00
CR55P2A	5.00	5.00	10.00	-	5.00
CR46P2A	4.00	6.00	10.00	-	5.00
CR55P1A	5.00	5.00	-	10.00	5.00
CR55P2	5.00	5.00	10.00	-	-
CR55P1	5.00	5.00	-	10.00	-

### 3.3.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุพันธ์ไคโตซาน

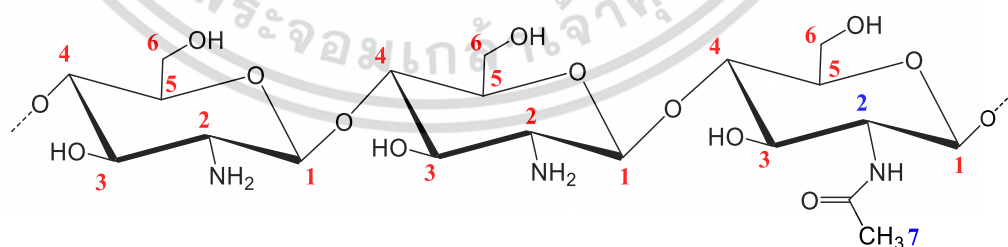
#### 3.3.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

นำสารตัวอย่างดังตารางที่ 3.4 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NMR โหมดโปรตอน ( $^1\text{H-NMR}$ ) บันทึกผลที่ได้ในรูปแบบ  $^1\text{H-NMR Spectra}$  แสดงค่า Chemical shift;  $\delta$  (ppm) เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์การแทนที่ (%DS) และเปอร์เซ็นต์องค์การกำจัดหมู่อะเซทิล (%DD)

##### 1) การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์การกำจัดหมู่อะเซทิล (%DD)

$$\%DD = 100 - \%Chitin \quad (3.3)$$

$$\text{เมื่อ } \%Chitin = \frac{\text{Integral area of H in } C_7 / 3}{\text{Integral area of H in } C_2} \times 100 \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของไคโตซาน

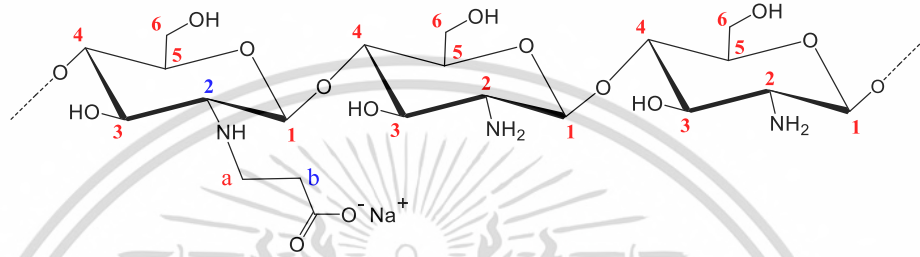
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์การแทนที่ (%DS) ของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน

$$\%DS_{CECS} = \frac{H_b/2}{(H_{\delta_{3.3-4.1}} + H_2)/6} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $H_b$  คือ Integral area ของโปรตอนตำแหน่ง  $H_b$  ที่ค่า  $\delta$  ช่วง 2.3 ppm

$H_{\delta_{3.3-4.1}} + H_2$  คือ Integral area ของโปรตอนที่ค่า  $\delta = 3.3 - 4.1$  และ 2.7 ppm



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน

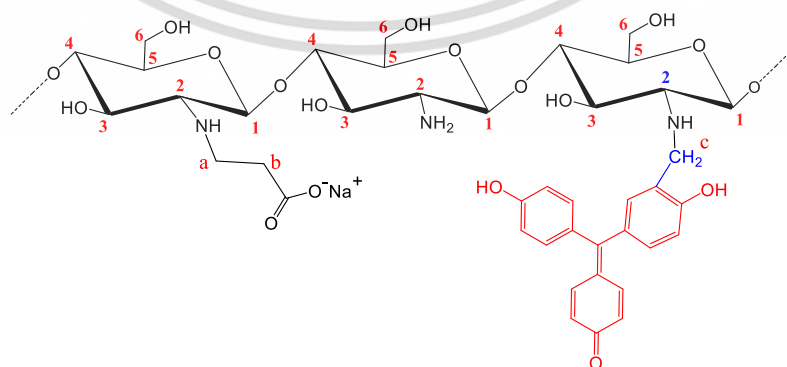
3) การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์การแทนที่ (%DS) ของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสี่ออร์น

$$\%DS_{CECS-g-RA} = \frac{H_{Ar}/11}{(H_{\delta_{3.3-4.1}} + H_2)/6 + 2H_c} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $H_{Ar}$  คือ Integral area ของโปรตอนตำแหน่งหมู่อะโรมาติก

$H_{\delta_{3.3-4.1}} + H_2$  คือ Integral area ของโปรตอนที่ค่า  $\delta = 3.3 - 4.1$  และ 2.7 ppm

$H_c$  คือ Integral area ของโปรตอนตำแหน่งหมู่เมทิลีน โดย  $H_c = H_{Ar}/11$



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสี่ออร์น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สารตัวอย่างและชนิดตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์  $^1\text{H-NMR}$

สารตัวอย่าง	ตัวทำละลาย
CS	$\text{D}_2\text{O} + \text{CF}_3\text{COOD}$
OSA	$\text{D}_2\text{O}$
CECS	$\text{D}_2\text{O}$
CECS-g-RA	$\text{D}_2\text{O}$

### 3.3.7.2 การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ

ซึ่งสารตัวอย่างในช่วง 5 มิลลิกรัม และห่อด้วยแผ่นดีบุกบาง ๆ เป็นแคปซูล จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องสุ่มตัวอย่างอัตโนมัติ (Autosampler) แคปซูลตัวอย่างจะถูกนำไปหย่อนลงในหลอดเผาไหม้ในเครื่อง EA และทำการเผาไหม้ต่อไป เพื่อใช้คำนวณหา % ธาตุองค์ประกอบและ %DS ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\%DS = \frac{\frac{\%C_{\text{CECS-g-RA}}}{\%N_{\text{CECS-g-RA}}} - \frac{\%C_{\text{CECS}}}{\%N_{\text{CECS}}}}{n} \times 1.1667 \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\%C_{\text{CECS-g-RA}}$  = % ธาตุคาร์บอนของโคโตซานดัดแปร  $\%C_{\text{CS}}$  = % ธาตุคาร์บอนของโคโตซาน  
 $\%N_{\text{CECS-g-RA}}$  = % ธาตุไนโตรเจนของโคโตซานดัดแปร  $\%N_{\text{CS}}$  = % ธาตุไนโตรเจนของโคโตซาน  
 $n$  = จำนวนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดอนุพันธ์

### 3.3.8 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติของฟิล์ม

#### 3.3.8.1 ความหนา (Thickness)

วัดความหนาของฟิล์มเพื่อดูความสม่ำเสมอของฟิล์ม โดยใช้ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) วัดความหนา 10 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

#### 3.3.8.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มสามารถตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) โดยที่บริเวณพื้นผิวนำฟิล์มไปเคลือบด้วยทองคำ และส่วนตัดขวางของฟิล์ม โดยหักฟิล์มภายใต้ไนโตรเจนเหลวก่อนนำไปเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.3.8.3 การวัดเฉดสี

ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 3$  เซนติเมตร จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาวัดเฉดสีด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 โดยแสดงผลเป็นค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ซึ่งมีหลักการดังนี้

$L^*$  : บ่งบอกถึงค่าความสว่าง (Lightness)

$$L^* = 0 = \text{สีดำ}$$

$$L^* = 100 = \text{สีขาว}$$

$$\text{ผลต่างของค่าความสว่าง } (\Delta L^*) = L^*_A - L^*_B \quad (3.8)$$

เมื่อ  $L^*_A$  = ค่าความสว่างของฟิล์มหลังการทดสอบ

$L^*_B$  = ค่าความสว่างของฟิล์มก่อนการทดสอบ

$a^*$  : บ่งบอกถึงเฉดสีแดงหรือสีเขียว (Red-Green)

$a^*$  มีค่าเป็นลบ แสดงถึงมีค่าสีไปในทิศทางของสีเขียว

$a^*$  มีค่าเป็นบวก แสดงถึงมีค่าสีไปในทิศทางของสีแดง

$$\text{ผลต่างของเฉดสีแดง-เขียว } (\Delta a^*) = a^*_A - a^*_B \quad (3.9)$$

เมื่อ  $a^*_A$  = ค่าเฉดสีแดง-เขียวของฟิล์มหลังการทดสอบ

$a^*_B$  = ค่าเฉดสีแดง-เขียวของฟิล์มก่อนการทดสอบ

$b^*$  : บ่งบอกถึงเฉดสีเหลืองหรือน้ำเงิน (Yellow-Blue)

$b^*$  มีค่าเป็นลบ แสดงถึงมีค่าสีไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

$b^*$  มีค่าเป็นบวก แสดงถึงมีค่าสีไปในทิศทางของสีเหลือง

$$\text{ผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง } (\Delta b^*) = b^*_A - b^*_B \quad (3.10)$$

เมื่อ  $b^*_A$  = ค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลืองของฟิล์มหลังการทดสอบ

$b^*_B$  = ค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลืองของฟิล์มก่อนการทดสอบ

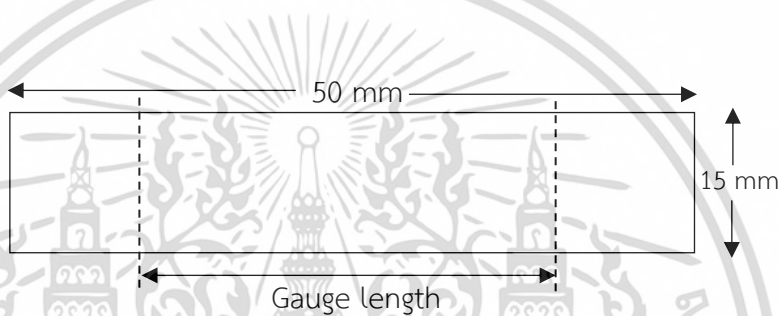
### 3.3.8.4 การทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy

ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 3$  cm<sup>2</sup> จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

### 3.3.8.5 การทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยึด (Tensile strength)

ทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์ม ซึ่งผ่านการอบแล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 5$  % ก่อนนำมาทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตามมาตรฐาน ASTM D-882 ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

ลักษณะชิ้นงาน รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด	: 50×15 mm <sup>2</sup>
อัตราเร็วในการดึง	: 50 mm/min
Load cell	: 100 N
Gauge length	: 30 mm
จำนวนชิ้นงาน	: 5 ชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = \frac{F}{A} \quad (3.11)$$

$$\text{ร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด (\%Elongation at break)} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \quad (3.12)$$

เมื่อ	F	=	แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm <sup>2</sup> )
	L	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l <sub>0</sub>	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 30 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.8.6 การทดสอบการหาปริมาณความชื้นในฟิล์ม (Moisture content)

1. ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  เก็บฟิล์มไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 5\%$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าฟิล์มเริ่มต้น จากนั้นจึงนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3) บันทึกน้ำหนักฟิล์มทุก ๆ 24 ชั่วโมงจนครบ 48 ชั่วโมง
- 4) คำนวณหาปริมาณน้ำในฟิล์มจากสมการที่ 3.13

$$\text{ปริมาณน้ำในฟิล์ม (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มหลังอบ} - \text{น้ำหนักของฟิล์มเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักของฟิล์มเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.13)$$

### 3.3.8.7 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling test)

1. ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $1 \times 1 \text{ cm}^2$
2. ชั่งน้ำหนักฟิล์มแล้วบันทึกค่า (เทคนิค 4 ตำแหน่ง)
3. แช่วฟิล์มลงในสารละลายต่าง ๆ ดังนี้
  - น้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
  - สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำฟิล์มขึ้นมาชั่งน้ำหนักก่อนนำไปชั่งน้ำหนักที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 720 และ 1,440 นาทีโดยสามารถคำนวณหาการบวมตัวจากสมการที่ 3.14

$$\text{การบวมตัว (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มหลังแช่} - \text{น้ำหนักของฟิล์มเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักของฟิล์มเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.14)$$

### 3.3.8.8 การทดสอบหาปริมาณการดูดซับน้ำของฟิล์ม (Water retention capacity)

1. นำฟิล์มจากข้อที่ 3.3.8.7 หลังจากการทดสอบการบวมตัวครบ 24 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนัก (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เมื่ออบฟิล์มจนแห้ง นำฟิล์มมาชั่งน้ำหนัก
3. คำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับน้ำของฟิล์ม จากสมการที่ 3.15

$$\text{การดูดซับน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มหลังบวมตัว} - \text{น้ำหนักของฟิล์มหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของฟิล์มหลังอบ}} \times 100 \quad (3.15)$$

4. แต่ละสูตรทำซ้ำ 3 ซ้ำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.8.9 การทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ (Solid remain)

1. นำฟิล์มจากข้อที่ 3.3.8.7 หลังจากการทดสอบการบวมตัวครบ 24 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เมื่ออบฟิล์มจนแห้ง นำฟิล์มมาชั่งน้ำหนัก
3. คำนวณหาปริมาณร้อยละของแข็งคงเหลือจากสมการที่ 3.16

$$\text{ของแข็งคงเหลือ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของฟิล์มเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.16)$$

4. แต่ละสูตรทำซ้ำ 3 ซ้ำงาน

### 3.3.8.10 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability; WVP)

1. นำแคลเซียมคลอไรด์ 10 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บในเดซิเคเตอร์
2. นำฟิล์มที่ต้องการทดสอบไปคลุมบนปากแก้ววีคมีอย่างน้อย 3.2 cm โดยภายในแก้วบรรจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์จากข้อ 1 (ความชื้นสัมพัทธ์ 5±5 เปอร์เซ็นต์) จากนั้นนำมาเก็บในเดซิเคเตอร์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 75±5 เปอร์เซ็นต์
3. ชั่งน้ำหนักฟิล์มทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน บันทึกน้ำหนักที่ได้ และทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง
4. นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟเป็นฟังก์ชันของเวลา และหาความชันจากกราฟ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{WVTR} = \frac{G}{tA} \quad (3.17)$$

โดยที่  $G$  = น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (g)

$t$  = เวลา (day)

$G/t$  = ความชันของกราฟ (g/day)

$A$  = พื้นที่ปากแก้ว (m<sup>2</sup>)

WVTR = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g/day\*m<sup>2</sup>)

5. นำค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมาใช้ในการคำนวณหาค่าการซึมผ่านของไอน้ำ จากสมการที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Water vapor permeability} = \frac{WVTR}{S(R_1 - R_2)} \times L \quad (3.18)$$

โดย	WVTR	= อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g/day*m <sup>2</sup> )
	S	= ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิในเดซิเคเตอร์ (Pa)
	R <sub>1</sub>	= ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในโถ 75±5 เปอร์เซ็นต์
	R <sub>2</sub>	= ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในขวด 5±5 เปอร์เซ็นต์
	L	= ความหนาเฉลี่ยแผ่นฟิล์ม (m)

### 3.3.8.11 การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH response analysis)

#### การทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์

1. ตัดฟิล์มที่มีความหนา 65±5 ไมครอน เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 2×3 cm<sup>2</sup>
2. วัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer และวัดเจตสีด้วยเครื่องวัดเจตสี
3. แช่ฟิล์มลงในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4-14 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
4. นำฟิล์มขึ้นจากสารละลายบัฟเฟอร์แล้วซับให้แห้ง
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์ม แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากสมการที่ 3.19

$$\text{ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance difference)} = A_A - A_B \quad (3.19)$$

เมื่อ  $A_A$  = ค่าการดูดกลืนแสงหลังทดสอบ ณ ตำแหน่งที่สีย้อมออริโนสามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด

$A_B$  = ค่าการดูดกลืนแสงก่อนทดสอบ ณ ตำแหน่งที่สีย้อมออริโนสามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด

6. วัดเจตสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ผลต่างของเจตสีแดง-เขียว ( $\Delta a^*$ ) และผลต่างของเจตสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากสมการที่ 3.8-3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดสอบด้วยไอ

1. ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $1 \times 2$  cm<sup>2</sup>
2. แช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำฟิล์มขึ้นมาล้างน้ำกลั่น 2 ครั้ง แล้วซับให้แห้ง
3. เตรียมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 0.5, 5, 15 และ 30% จะให้ไอที่มีค่าพีเอชเป็น 8, 9, 10 และ 11 ตามลำดับ
4. นำสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้นต่าง ๆ มา 10 มิลลิลิตร ใส่แก้วแล้วนำไปเก็บไว้ในขวดที่มีฝาปิด โดยขวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.5 เซนติเมตร ความสูง 7 เซนติเมตร ปิดฝาทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที
5. วัดพีเอชของไอภายในขวดด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์
6. นำฟิล์มที่ได้จากข้อ 2 ใส่ลงไปในขวดให้สัมผัสกับไอของแอมโมเนีย (ไม่ให้โดนสารละลาย) ปิดฝาขวดให้สนิท
7. สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม โดยฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีชมพู พร้อมบันทึกเวลาที่ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสี

### 3.3.8.12 การทดสอบการหลุดออกของสีย้อม

1. ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $2 \times 2$  cm<sup>2</sup>
2. แช่ฟิล์มในเอทานอล 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
3. นำสารละลายที่ได้จากการแช่ฟิล์มครบ 48 ชั่วโมง ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

### 3.3.8.13 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay

1. เตรียมเซลล์ไลน์ Vero (African green monkey fibroblast) ในอาหาร Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) เสริมด้วย 10% FBS โดยเพาะเลี้ยงในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 25 ตารางเซนติเมตร
2. เตรียม Stock สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยกรองด้วยแผ่นกรองที่มีช่องผ่านขนาด 0.2 ไมโครเมตร และใส่ขวดแก้วที่ปลอดเชื้อ หุ้มขวดแก้วด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันแสง
3. เตรียมสารตัวอย่างความเข้มข้นสูงสุด 1,000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (กรณีฟิล์มละลายหมด) ในสารละลาย PBS
4. แยกเซลล์ไลน์ Vero จำนวน  $5 \times 10^4$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร ลงในงานเพาะเลี้ยงชนิด 96 หลุม (96-well plate) ปริมาตร 100 ไมโครลิตรต่อหลุม นำงานเพาะเลี้ยงที่ปลูกเซลล์แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เซลล์จะเจริญเติบโตบริเวณก้นหลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำงานเพาะเลี้ยงเซลล์ออกจากตู้บ่ม ดูอาหารออกจากหลุมให้หมดแล้วเติมสารตัวอย่างความเข้มข้นที่กำหนด (กลุ่มควบคุมเป็นเซลล์ปกติ ซึ่งเพาะเลี้ยงในอาหาร DMEM) ปริมาตร 100 ไมโครลิตรต่อหลุม นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6. เมื่อบ่มเซลล์ในสารตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ดูดสารละลาย MTT ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ใส่ลงไปในแต่ละหลุมที่ทดสอบ ปริมาตร 10 ไมโครลิตรต่อหลุม นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สารละลาย MTT จะเข้าไปในไมโทคอนเดรียของเซลล์ที่มีชีวิต และถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของผลึกฟอร์มazan ซึ่งเป็นผลึกสีม่วงไม่ละลายน้ำ

7. จากนั้นดูดสารละลาย MTT ทิ้ง แล้วเติมสารละลาย Dimethyl sulfoxide :10% Sodium dodecyl sulfate อัตราส่วน 9:1 ปริมาตร 150 ไมโครลิตรต่อหลุม เพื่อละลายผลึกฟอร์มazan จะได้สารละลายสีม่วง

8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องไมโครไตเตอร์ เพลท รีดเดอร์ ที่ความยาวคลื่นของแผ่นกรองแสงเท่ากับ 570 นาโนเมตร

9. คำนวณหาค่า %Cytotoxicity ของแต่ละความเข้มข้นดังนี้

$$\%Cytotoxicity = [(A-B) / A] \times 100 \quad (3.20)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมควบคุม (หลุมที่มีเซลล์ในอาหารเพาะเลี้ยง)

B = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมที่มีเซลล์ในสารตัวอย่างแต่ละความเข้มข้น

10. คำนวณหาค่า %Cell viability จาก 100 - %Cytotoxicity ถ้ามีค่ามากกว่า 70% หมายความว่าฟิล์มตัวอย่างไม่เป็นพิษต่อเซลล์ ถ้า %Cell viability มีค่าต่ำกว่า 70% หมายความว่าฟิล์มตัวอย่างเป็นพิษต่อเซลล์

### 3.3.9 การทดสอบการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชกับตัวอย่างอาหาร (Food sample measurement)

#### ตัวอย่างที่ 1 นมพลาสเจอไรซ์

- ตัดฟิล์มที่มีความหนา 65±5 ไมโครเมตรเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 1×2 cm<sup>2</sup> ชั้นที่ 1 วางลงบนงานเพาะเชื้อ ชั้นที่ 2 นำไปติดตรงกึ่งกลางของฝาปิดจานเพาะเชื้อ จำนวน 4 จานเพาะเชื้อ
- วัดค่าพีเอชนมพลาสเจอไรซ์เริ่มต้นด้วยเครื่องวัดพีเอช
- เทนมพลาสเจอไรซ์ 20 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อแล้วปิดฝาจานเพาะเชื้อจากนั้นหุ้มด้วยพาราฟิล์มจนรอบจานเพาะเชื้อ
- นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 26±4 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 75% เป็นเวลา 0-4 วัน
- นำฟิล์มออกจากจานเพาะเชื้ออันที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อครบเวลา 1, 2, 3 และ 4 วัน ตามลำดับ จากนั้นนำฟิล์มมาล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ซับให้แห้งแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

6. วัดค่าพีเอชของนมพลาสเจอไรซ์ทุกวันที่นำฟิล์มออกจากจานเพาะเชื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

7. ปิเปตนมจากในงานเพาะเชื้อมา 10 มิลลิลิตร นำมาไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยมีฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นกรดจากสมการที่ 3.21

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นกรด (\%acidity)} = \frac{C_{\text{NaOH}} (\text{M}) \times V_{\text{NaOH}} (\text{ml}) \times \text{Eq.wt}}{V_{\text{milk}} (\text{ml}) \times 10} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $C_{\text{NaOH}}$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)

$V_{\text{NaOH}}$  = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (mL)

$V_{\text{milk}}$  = ปริมาตรของตัวอย่างนมพลาสเจอร์ไรซ์ (mL)

Eq.wt = น้ำหนักโมเลกุลของกรดแลคติกต่ออัตราส่วนจำนวนโมลของ NaOH ต่อกรดแลคติก มีค่าเท่ากับ 90

### ตัวอย่างที่ 2 เนื้อปลา

1. ตัดฟิล์มที่มีความหนา  $65 \pm 5$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $2 \times 3 \text{ cm}^2$
2. แช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำฟิล์มขึ้นมาล้างน้ำกลั่น 2 ครั้ง แล้วซับให้แห้ง
3. วัดเฉดสีของฟิล์มเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดเฉดสีแล้วนำฟิล์มไปติดตรงกึ่งกลางของฝาปิดจานเพาะเชื้อ
4. ชั่งเนื้อปลา 10 กรัม ลงบนจานเพาะเชื้อ จากนั้นปิดฝาจานเพาะเชื้อแล้วหุ้มด้วยพาราฟิล์มจนรอบจานเพาะเชื้อ
5. นำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $26 \pm 4$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน
6. วัดเฉดสีของฟิล์มที่เวลา 1, 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ด้วยเครื่องวัดเฉดสีแล้วคำนวณหาผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ผลต่างของเฉดสีแดง-เขียว ( $\Delta a^*$ ) และผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากสมการที่ 3.8-3.10
7. คำนวณค่าความแตกต่างของสี (The total color difference ;  $\Delta E$ ) จากสมการที่ 3.22

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (3.22)$$

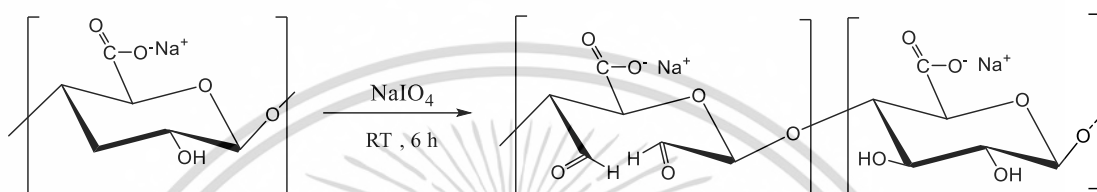
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินต

การสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินตจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน แสดงปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.1

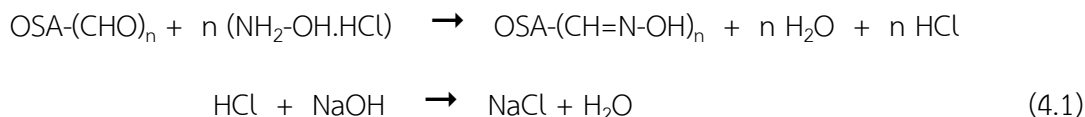


รูปที่ 4.1 สมการปฏิกิริยาการสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินต

จากการสังเคราะห์ออกซิไดซ์อัลจินตโดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโซเดียมอัลจินต และโซเดียมเพอร์ไอโอดีตซึ่งปฏิกิริยาเกิดที่หมู่ไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ของอัลจินตเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ จากนั้นเติมเอทิลีนไกลคอลเพื่อหยุดปฏิกิริยา เอทิลีนไกลคอล จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโซเดียมเพอร์ไอโอดีตที่เหลืออยู่ จากนั้นนำสารละลายไปผ่าน กระบวนการไดอะไลซิสเพื่อกำจัดโซเดียมเพอร์ไอโอดีต และเอทิลีนไกลคอลที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกแล้ว นำสารละลายไปตกตะกอนในเอทานอล ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว และมีผลผลิต ร้อยละอยู่ในช่วง 70-80

##### 4.1.1 ผลการหาปริมาณแอลดีไฮด์ในโครงสร้างออกซิไดซ์อัลจินต

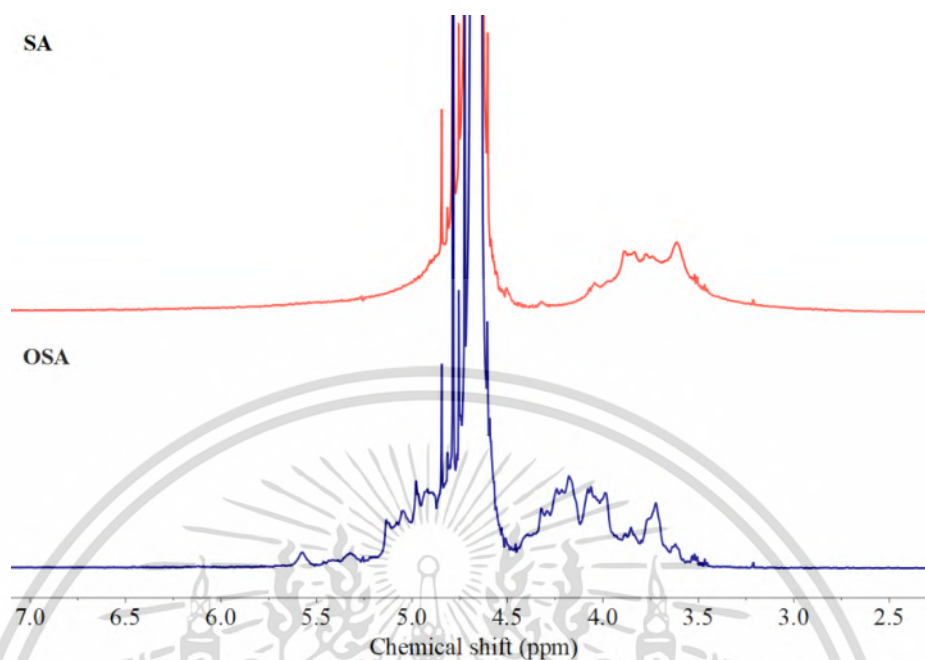
จากการหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์ในโครงสร้างออกซิไดซ์อัลจินต โดยหมู่ฟังก์ชัน แอลดีไฮด์ของออกซิไดซ์อัลจินตทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์จะปล่อย กรดไฮโดรคลอริก ปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 4.1 จากนั้นนำมาไทเทรตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยมี เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง



จากสมการที่ 3.2 สามารถคำนวณหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์เฉลี่ยในโครงสร้างของ ออกซิไดซ์อัลจินตได้เท่ากับ 5.7 มิลลิโมลต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของออกซีไดซ์อัลจินตด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$

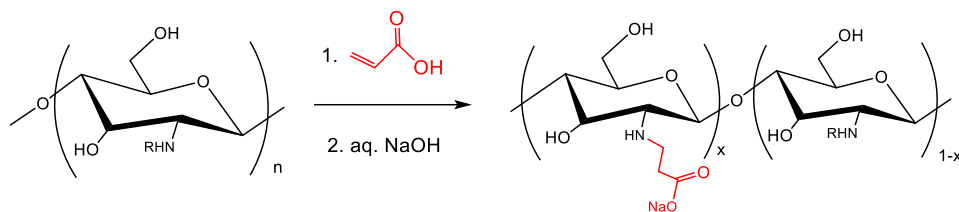


รูปที่ 4.2  $^1\text{H-NMR}$  spectra ของ SA และ OSA

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของออกซีไดซ์โซเดียมอัลจินตด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  (รูปที่ 4.2) พบสัญญาณโปรตอนที่แตกต่างออกไปจากสิ่งแวดล้อมเดิมของโซเดียมอัลจินตในลักษณะพีคแบบ Multiplet ที่มีค่า  $\delta$  อยู่ในช่วง 4.6-5.6 ppm ซึ่งแสดงถึงค่า  $\delta$  ที่เกิดขึ้นใหม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์ OSA ได้

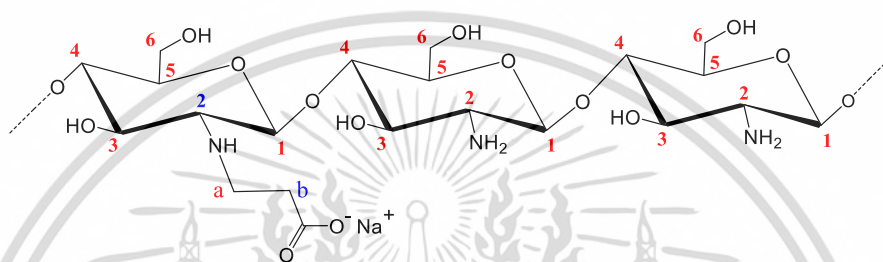
#### 4.2 ผลการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน

การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานจากปฏิกิริยาการเติมแบบไม่เคล็ดด้วยกรดอะคริลิก ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ตำแหน่งหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของโคโตซาน และตำแหน่งพันธะคูในโครงสร้างของ กรดอะคริลิก เกิดเป็นคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานที่สามารถละลายน้ำได้ดี โดยมีผลผลิตร้อยละในช่วง 85-90 แสดงปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3



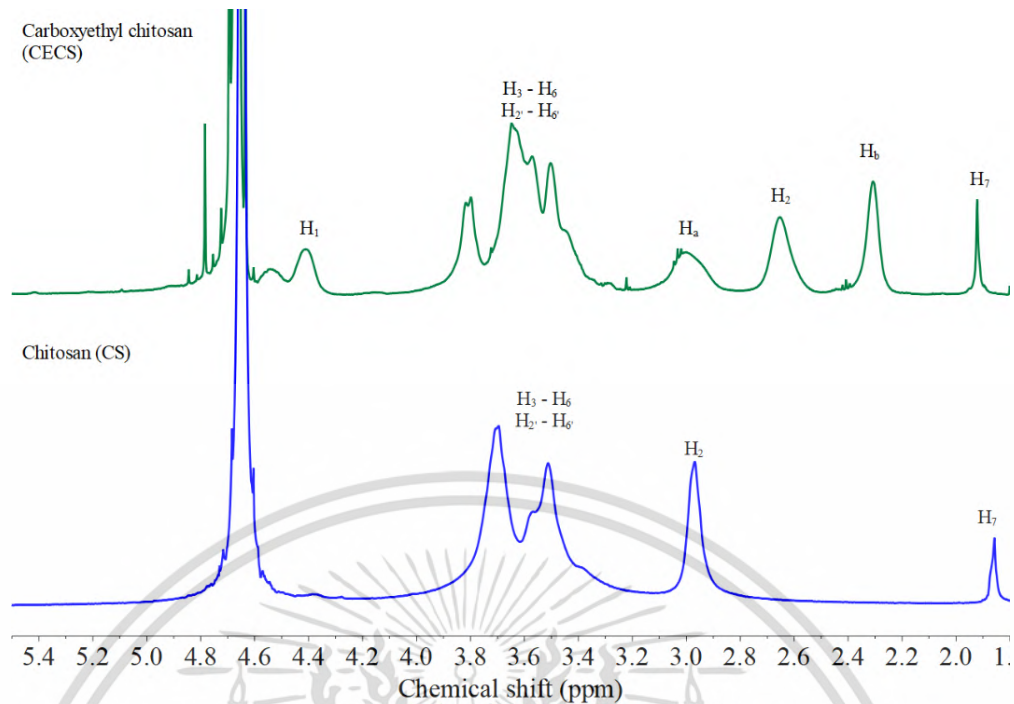
รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน

#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน

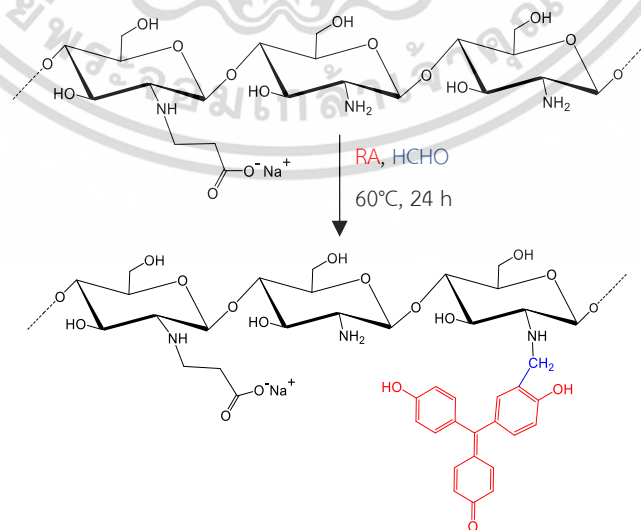
จากการวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  แสดงผลในรูปของ  $^1\text{H-NMR}$  spectra (รูปที่ 4.5) จาก  $^1\text{H-NMR}$  spectra ของโคโตซานพบสัญญาณโปรตอนของคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ที่  $\delta$  เท่ากับ 3.04 ppm โปรตอนตำแหน่งเมทิลีนและหมู่เมทิลีน (H-6,4,3,5) มีค่า  $\delta$  อยู่ในช่วง 2.97 - 3.70 ppm และสัญญาณโปรตอนของหมู่อะเซทิลของโคตินที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 7 ที่  $\delta$  เท่ากับ 1.93 ppm [42] และจาก  $^1\text{H-NMR}$  spectra ของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานพบสัญญาณโปรตอนใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $\text{H}_a$  และ  $\text{H}_b$  ของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน โดยขึ้นที่  $\delta$  เท่ากับ 3.02 และ 2.31 ppm ตามลำดับ [43-44] และสามารถหาองค์การแทนที่ของกรดอะคริลิกบนโครงสร้างของโคโตซานได้จาก  $^1\text{H-NMR}$  spectra ของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน โดยการนำ Integral area ของตำแหน่ง  $\text{H}_2$  และ  $\text{H}_b$  มาคำนวณตามสมการที่ 3.5 ได้ค่าองค์การแทนที่ของกรดอะคริลิกบนโคโตซานเท่ากับ 40.28%



รูปที่ 4.5  $^1\text{H-NMR}$  spectra ของ CS และ CECS

#### 4.3 ผลการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน

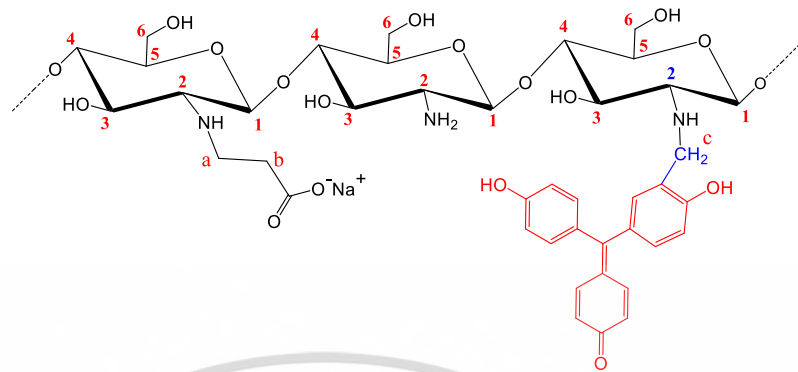
จากการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรินผ่านปฏิกิริยาแมนนิช โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งหมู่เอมิโนบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอร์มาลดีไฮด์ และตำแหน่งอโทบนโครงสร้างของสีย้อมออรินซึ่งเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยหมู่เมทิลีน (Methylene bridge;  $-\text{CH}_2-$ ) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีแดงที่สามารถละลายน้ำได้ ปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน

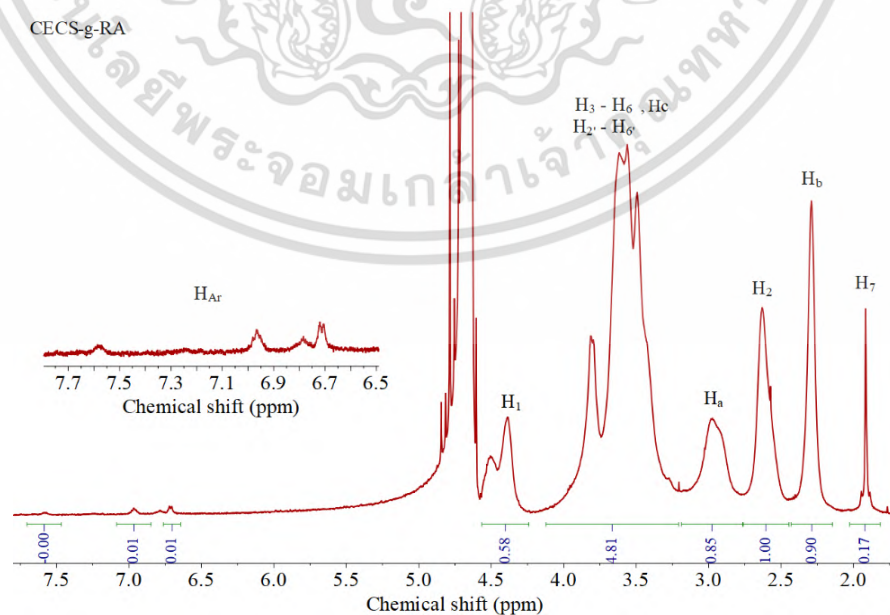
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เป็นได้ ไม่นับเป็นต้นฉบับไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย $^1\text{H-NMR}$



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งโปรตอนในโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออรินด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  (รูปที่ 4.8) พบสัญญาณโปรตอนเกิดขึ้นใหม่ที่  $\delta$  ช่วง 6.6 – 7.6 ppm ซึ่งแสดงถึงสัญญาณโปรตอนของวงอะโรมาติกบนโครงสร้างของสีย้อมออริน [45] และพบสัญญาณโปรตอนตำแหน่ง  $\text{H}_3\text{-H}_6$  และ  $\text{H}_2\text{-H}_6$  ที่  $\delta$  ในช่วง 3.3 - 4.1 ppm อย่างไรก็ตามสัญญาณโปรตอนของตำแหน่งหมู่เมทิลีน ( $\text{H}_c$ ) ที่แสดงถึงการเชื่อมต่อของสีย้อมออรินบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานด้วยหมู่เมทิลีน (methylene bridge;  $-\text{CH}_2-$ ) ไม่สามารถระบุได้ชัดเจน โดยขึ้นซ้อนทับอยู่ในช่วง  $\delta$  เท่ากับ 3.3 - 4.1 ppm ค่าองค์การแทนที่ของสีย้อมออรินบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 โดยมีค่าเท่ากับ 0.19%



รูปที่ 4.8  $^1\text{H-NMR}$  spectra ของ CECS-g-RA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ

จากการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง EA สามารถแสดง % ธาตุองค์ประกอบของโคโตซาน คาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน และคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริจันจากปฏิกิริยาแมนนิช ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 % ธาตุองค์ประกอบของ CS CECS และ CECS-g-RA

% Element	CS	CECS	CECS-g-RA
C	38.94	35.48	35.01
H	6.46	6.20	6.08
N	7.21	5.50	5.03

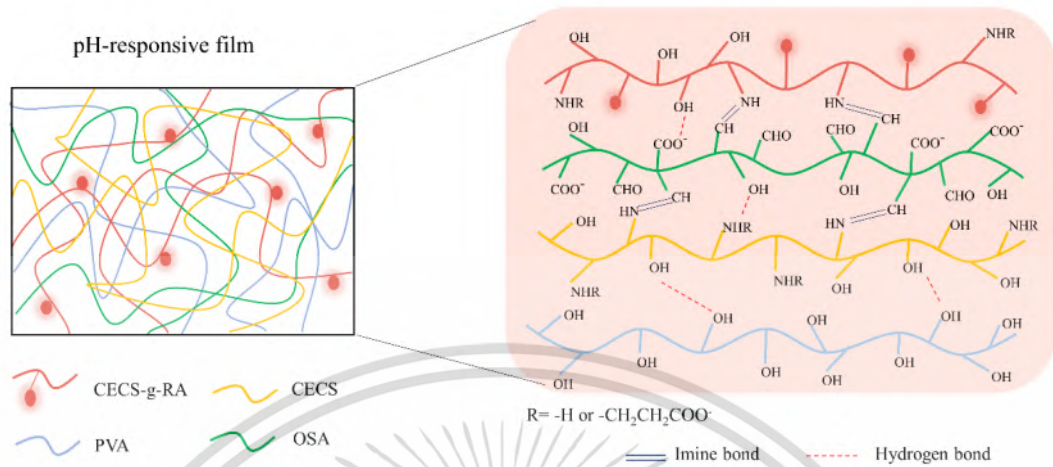
จากตารางที่ 4.1 พบว่า % ธาตุไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลง แสดงว่า กรดอะคริลิกสามารถเข้าทำปฏิกิริยาบนโคโตซานเกิดเป็นคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานได้ โดยคำนวณหาค่าองค์การแทนที่ของกรดอะคริลิกบนโคโตซานได้เท่ากับ 40.83% และ สีย้อมออริจันสามารถเข้าทำปฏิกิริยาบริเวณตำแหน่งหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานได้ โดยคำนวณหาค่าองค์การแทนที่ (DS) จากสมการที่ 3.7 ได้เท่ากับ 2.97%

จากการคำนวณค่าองค์การแทนที่จากเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  และเทคนิค EA พบว่า %DS ของ CECS จากเทคนิค EA (40.83%) และ  $^1\text{H-NMR}$  (40.28%) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ %DS ของ CECS-g-RA จากเทคนิค EA (2.97%) มีค่าสูงกว่า %DS จากเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  (0.19%) เนื่องจากเทคนิค EA เป็นการหาธาตุองค์ประกอบด้วยวิธีการเผาไหม้สารทั้งหมด โดยภายในโครงสร้างของอนุพันธ์โคโตซาน มีเกลือโซเดียมเป็นองค์ประกอบเมื่อเกิดการเผาไหม้ทำให้น้ำหนักสารที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า %DS จากเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$

### 4.4 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์ม

จากการเตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจาก CECS, CECS-g-RA, PVA และ OSA ในสัดส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.3 แล้วนำมาหาความหนาเฉลี่ยโดยใช้ไมโครมิเตอร์ผลปรากฏว่าฟิล์มแต่ละสูตรมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ  $65 \pm 5 \mu\text{m}$  พบว่าฟิล์มสูตร CR55P1 และ CR55P2 สามารถละลายน้ำได้เนื่องจากไม่มี OSA เป็นองค์ประกอบ ในขณะที่ฟิล์มสูตรอื่น ๆ ที่มี OSA เป็นองค์ประกอบมีความคงทนมากขึ้นสามารถทนตัวทำละลายที่เป็นน้ำ กรด และเบสได้ เนื่องจาก OSA ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงทางชีวภาพ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์บนโครงสร้างของ OSA สามารถเกิดพันธะอิมินกับหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของ CECS และ CECS-g-RA ได้ นอกจากนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลของแต่ละองค์ประกอบส่งผลให้ฟิล์มสูตรอื่น ๆ ที่มี OSA เป็นองค์ประกอบ มีความแข็งแรงมากขึ้นเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

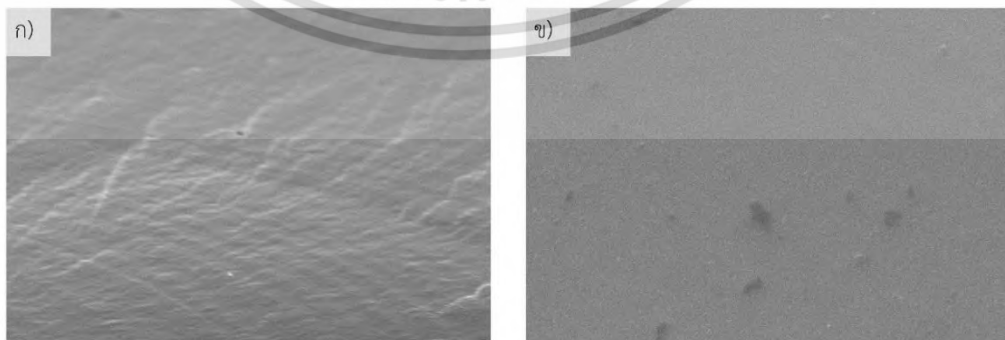
คงทนมากขึ้นสามารถทนตัวทำละลายที่เป็นน้ำ กรด และเบสได้ โดยแบบจำลองการเชื่อมโยงภายในฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แบบจำลองการเชื่อมโยงภายในฟิล์ม

#### 4.4.1 สัณฐานวิทยา

จากการศึกษาความเข้ากันได้ของแต่ละองค์ประกอบของฟิล์ม ทำได้โดยการนำฟิล์มมาทดสอบสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิว และภาพตัดขวางของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิว และภาพตัดขวางของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.10 ฟิล์มสูตรที่เลือกนำมาทดสอบได้แก่ CR55P2A จากรูปที่ 4.10 ก) แสดงผลส่วนภาพตัดขวางของฟิล์มพบว่าแต่ละองค์ประกอบของฟิล์มไม่เกิดการแยกส่วนมีความเข้ากันได้ดี และจากรูปที่ 4.10 ข) แสดงผลบริเวณพื้นผิวของฟิล์ม พบว่ามีการกระจายตัวของสีย้อมซึ่งเป็นองค์ประกอบของฟิล์มไม่ดี เนื่องจากในกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริโนอาจเกิดการเชื่อมโยงกันบางส่วนจึงทำให้การกระจายตัวไม่สมบูรณ์เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนได้ อย่างไรก็ตามสีของฟิล์มที่ได้เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าสีมีความสม่ำเสมอไม่พบการเกาะเป็นกลุ่มก้อนของสีย้อม



รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของฟิล์มสูตร CR55P2A ก) ภาพตัดขวางของฟิล์มที่กำลังขยาย 2000x

และ ข) ภาพพื้นผิวของฟิล์มที่กำลังขยาย 2000x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ปริมาณความชื้นในฟิล์ม

การศึกษาปริมาณความชื้นในฟิล์มสามารถทำได้โดยการนำฟิล์มสูตรต่าง ๆ ไปเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 5$  % เวลา 24 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักก่อน และหลังนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $105$  °C จนกระทั่งน้ำหนักของฟิล์มคงที่ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 แม้ว่าฟิล์มแต่ละสูตรมีการผสมอัตราส่วนของ CECS-g-RA หรือ ความเข้มข้นของ PVA ที่แตกต่างกัน แต่พบว่าค่าปริมาณความชื้นในฟิล์มไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เพราะว่าฟิล์มมีองค์ประกอบที่เหมือนกัน คือ CECS, CECS-g-RA, PVA และ OSA ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความชอบน้ำที่เท่า ๆ กันทำให้ฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้ใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณความชื้นในฟิล์มอยู่ในช่วงประมาณ 19 – 22%

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความชื้นในฟิล์ม

สูตร	น้ำหนักฟิล์มก่อนอบ (g)	น้ำหนักฟิล์มหลังอบ (g)	ปริมาณความชื้นในฟิล์ม (%)
CR64P2A	$0.017 \pm 0.002$	$0.013 \pm 0.001$	$21.4 \pm 1.7$
CR55P2A	$0.018 \pm 0.002$	$0.014 \pm 0.001$	$19.2 \pm 2.2$
CR46P2A	$0.017 \pm 0.002$	$0.014 \pm 0.001$	$20.2 \pm 1.8$
CR55P1A	$0.015 \pm 0.001$	$0.012 \pm 0.001$	$19.1 \pm 1.9$

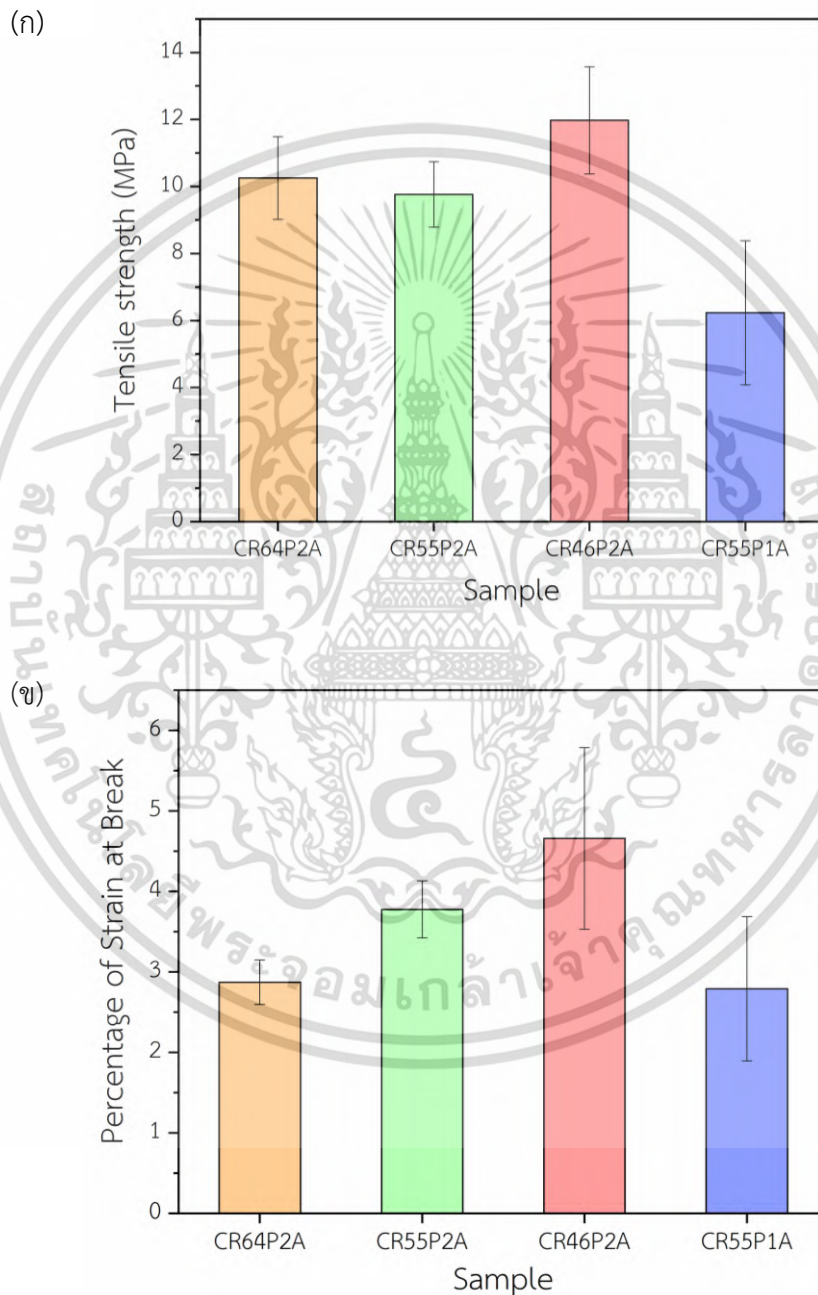
#### 4.4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยึด (Tensile strength)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 5$  % ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตามมาตรฐาน ASTM D-882 แสดงผลในรูปของค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด ดังรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.11 (ก-ข) แสดงค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดของฟิล์มทั้ง 4 สูตร โดยเปรียบเทียบฟิล์มสูตร CR55P2A และ CR55P1A พบว่าฟิล์มสูตร CR55P2A มีความแข็งแรงดึงเท่ากับ 12.1 MPa และเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดเท่ากับ 4.7 มากกว่า ฟิล์มสูตร CR55P1A ที่มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 6.2 MPa และเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดเท่ากับ 2.8 เนื่องจาก PVA มีสมบัติช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อีกทั้งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA ทำให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มที่ได้จึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ CECS-g-RA (เปรียบเทียบฟิล์มสูตร CR64P2A CR55P2A และ CR46P2A) ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากฟิล์มสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะอิมินระหว่างหมู่อะมิโนบนโครงสร้าง CECS-g-RA กับหมู่แอลดีไฮด์บนโครงสร้าง OSA ได้มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของสีย้อมมีหมู่ไฮดรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามได้ทำการเลือกฟิล์มสูตร CR55P2A ในการนำมาทดสอบการใช้เป็นฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชในงานบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากในงานบรรจุภัณฑ์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชเพียงพื้นที่เล็ก ๆ บนบรรจุภัณฑ์จึงไม่จำเป็นต้องใช้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงสูงจึงเลือกใช้ฟิล์มสูตร CR55P2A อีกทั้งยังลดการใช้ปริมาณ CECS-g-RA ที่ต้องผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างหลายขั้นตอนได้



รูปที่ 4.11 (ก) ค่าความแข็งแรงดึง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 ผลการทดสอบพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling test) ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water retention capacity) และปริมาณของแข็งคงเหลือ (Solid remain)

พฤติกรรมการบวมตัวเป็นสมบัติสำคัญสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งบรรจุภัณฑ์อาหารจำเป็นต้องสัมผัสความชื้นหรืออาหารที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น นม ซึ่งบรรจุภัณฑ์เหล่านี้ต้องมีความคงทน และเกิดการบวมตัวที่ต่ำ โดยฟิล์มที่นำมาทดสอบพฤติกรรมการบวมตัว ได้แก่ สูตร CR55P2A, CR55P1A และ CR55P2 ทดสอบในน้ำกลั่น และสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 แสดงผลดังรูปที่ 4.12 (ก-ค)

เนื่องจากองค์ประกอบของฟิล์มคือ คาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ การขึ้นรูปฟิล์มจึงต้องมีการเชื่อมโยง โดยการใช้ออกซิไดซ์ อัลจินเตเป็นสารเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์ม และช่วยให้ฟิล์มมีความคงทนต่อน้ำกลั่น และสารละลายบัฟเฟอร์พีเอชต่าง ๆ ได้

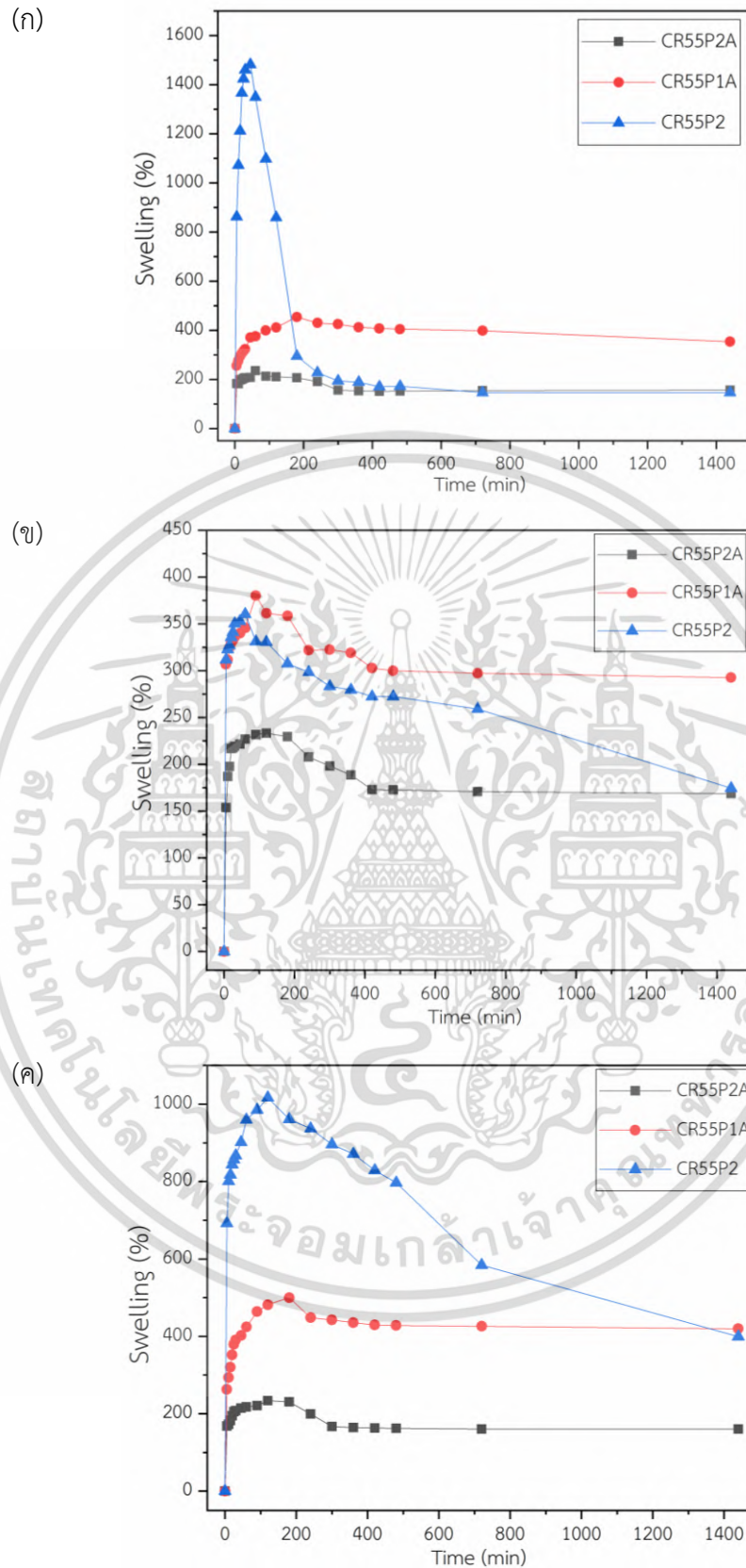
พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในกรณีที่ฟิล์มสามารถละลายได้บางส่วนในตัวกลางเกิดจากอัตราการแข่งขันระหว่างการดูดซับน้ำของฟิล์ม และการละลายของสารองค์ประกอบภายในฟิล์ม โดยช่วงเริ่มต้นฟิล์มมีอัตราการดูดซับน้ำสูงกว่าการละลายออกของสาร ทำให้มีค่าการบวมตัวสูงในช่วงเริ่มต้น และค่าการบวมตัวสูงสุดเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับน้ำของฟิล์ม และการละลายของสารเท่ากัน และค่าการบวมตัวจะลดลงเมื่ออัตราการละลายออกของสารมากกว่าการดูดซับน้ำของฟิล์ม จากรูปที่ 4.12 (ก-ค) พบว่าฟิล์มสูตร CR55P2 มีค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำกลั่น และสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 สูงที่สุดที่เวลา 45 60 และ 120 นาที ตามลำดับ และเริ่มมีค่าการบวมตัวลดลง แสดงถึงฟิล์มเกิดการละลายออกบางส่วน เนื่องจากฟิล์มสูตร CR55P2 ไม่มีองค์ประกอบของ OSA ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงทางชีวภาพทำให้ฟิล์มสูตรนี้มีการเชื่อมโยงจากพันธะไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว และองค์ประกอบอื่น ๆ ในฟิล์มล้วนเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ง่ายทำให้ค่าร้อยละการบวมตัวมีความทนทานในน้ำ หรือ สารละลายบัฟเฟอร์ต่ำ และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มสูตรที่มี OSA เป็นตัวเชื่อมโยงทางชีวภาพ (CR55P2A และ CR55P1A) พบว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงด้วย OSA สามารถเกิดพันธะอิมินซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์กับ CECS และ CECS-g-RA ได้ โดยค่าการบวมตัวของฟิล์มสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้น แล้วลดลงเล็กน้อยจากการละลายออกบางส่วนขององค์ประกอบภายในฟิล์ม จากนั้นค่าการบวมตัวเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 180 นาที แสดงถึงฟิล์มยังสามารถคงรูปอยู่ได้ในตัวกลางต่าง ๆ โดยมีค่าการบวมตัวต่ำกว่าการบวมตัวสูงสุดของฟิล์มสูตร CR55P2 ที่ไม่มี OSA เป็นตัวเชื่อมโยง ซึ่งค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มสูตร CR55P1A เมื่อทดสอบในน้ำกลั่นมีค่าร้อยละการบวมตัวอยู่ในช่วง 255 – 454, ที่พีเอช 4 มีค่าร้อยละการบวมตัวอยู่ในช่วง 290- 380, ที่พีเอช 9 มีค่าร้อยละการบวมตัวอยู่ในช่วง 262 – 500 ตามลำดับ ในกรณีที่พีเอช 4 พบว่าฟิล์มสูตร CR55P1 มีค่าการบวมตัวสูงกว่าฟิล์มสูตร CR55P2 เนื่องจากฟิล์มสูตร CR55P2 ที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วยพันธะอิมินเกิดการละลายออกของสารองค์ประกอบภายในฟิล์มได้อย่างรวดเร็วทำให้ค่าการบวมตัวสูงสุดต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มสูตร CR55P1A และเมื่อพิจารณาฟิล์มสูตร CR55P2A เทียบกับ CR55P1A ซึ่งมีปริมาณ PVA ต่างกัน พบว่าฟิล์มสูตร CR55P2A ซึ่งมีปริมาณ PVA มากกว่าส่งผลให้มีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้มากเกิดการเชื่อมโยงภายในฟิล์มมากขึ้นทำให้ตัวทำละลายแทรกผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้น้อยลง อีกทั้งยังทำให้การละลายออกของสารภายในฟิล์มลดลง ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความคงทน เกิดการบวมตัวในน้ำและสารละลายบัฟเฟอร์ได้ต่ำ โดยฟิล์มสูตร CR55P2A มีค่าร้อยละการบวมตัวในน้ำกลั่นอยู่ในช่วง 150 – 235, ที่พีเอช 4 มีค่าร้อยละการบวมตัวอยู่ในช่วง 153 – 233, ที่พีเอช 9 มีค่าร้อยละการบวมตัวอยู่ในช่วง 160 – 234 ตามลำดับ สรุปได้ว่าฟิล์มสูตร CR55P2A มีการเชื่อมโยงด้วยพันธะอีมีน และพันธะไฮโดรเจนมากที่สุดทำให้มีร้อยละการบวมตัวในน้ำ และสารละลายบัฟเฟอร์ต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงผลการทดสอบการดูดซับน้ำ และปริมาณของแข็งคงเหลือของฟิล์มที่แช่ในน้ำกลั่น สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 ตามลำดับ พบว่า ฟิล์มสูตร CR55P2 ซึ่งไม่มีองค์ประกอบของ OSA มีค่าการดูดซับน้ำสูงสุดในน้ำกลั่น สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 เท่ากับ 5193, 4257 และ 12783 % ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งคงเหลือมีค่าอยู่ในช่วง 7 – 10 % แสดงว่าฟิล์มมีการละลายออกในทั้ง 3 สภาวะ ในขณะที่ฟิล์มสูตร CR55P2A มีค่าการดูดซับน้ำต่ำกว่า และปริมาณของแข็งคงเหลือสูงกว่าฟิล์มสูตร CR55P2 อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีการดูดซับน้ำของฟิล์มที่แช่ในน้ำกลั่น สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 อยู่ในช่วง 390 - 410 % และปริมาณของแข็งคงเหลืออยู่ที่ 73 – 90 % เป็นเพราะว่าหมู่แอลดีไฮด์บนโครงสร้างของ OSA เกิดการเชื่อมโยงกับหมู่เอมีนบนโครงสร้างของ CECS และ CECS-g-RA ด้วยพันธะอีมีน ส่งผลให้ปริมาตรอิสระและการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้ลดลงทำให้ฟิล์มสูตร CR55P2A มีความคงทนต่อตัวทำละลาย และเมื่อพิจารณาฟิล์มสูตร CR55P1A ซึ่งมีปริมาณ PVA ลดลง พบว่าค่าปริมาณการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น และค่าปริมาณของแข็งคงเหลือลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร CR55P2A ซึ่งโครงสร้างของ PVA มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากช่วยให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างองค์ประกอบในฟิล์มเกิดการเชื่อมโยงสองระบบ อย่างไรก็ตามที่พีเอช 4 ฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงด้วย OSA ทั้ง 2 สูตร (CR55P2A และ CR55P1A) มีร้อยละของแข็งคงเหลือที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากโครงสร้างของ OSA ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมโยงฟิล์มเกิดการละลายออกในสภาวะกรดได้น้อย เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกในโครงสร้างของ OSA อยู่ในรูปของ  $-COOH$  มากกว่า  $-COO^-$  ซึ่งรูปของ  $-COOH$  ไม่ละลายน้ำ และยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ฟังก์ชันอื่น เช่น  $-OH$  ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ ฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วย OSA จึงคงสภาพในกรดได้ดี จากผลข้างต้นฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชสูตร CR55P2A มีค่าการบวมตัวต่ำ และมีปริมาณของแข็งคงเหลือมากกว่าร้อยละ 70 สามารถนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์ที่ทนต่อสภาวะที่เป็นกรดอ่อน หรือ เบสอ่อนได้

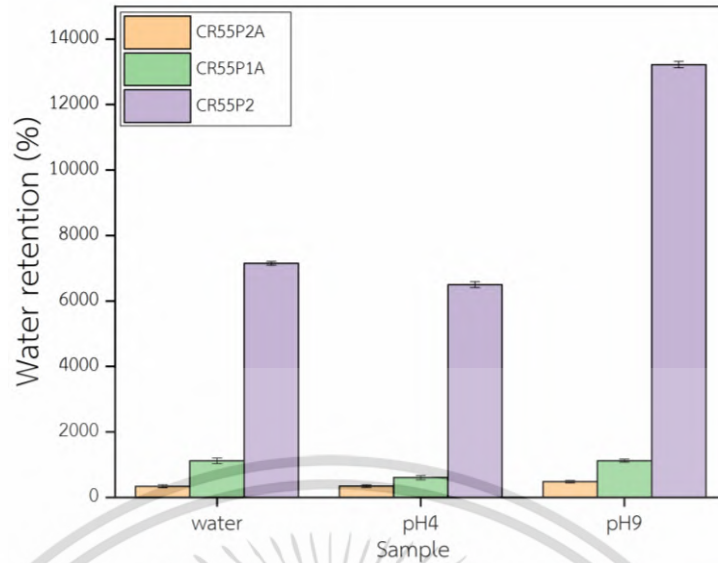
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



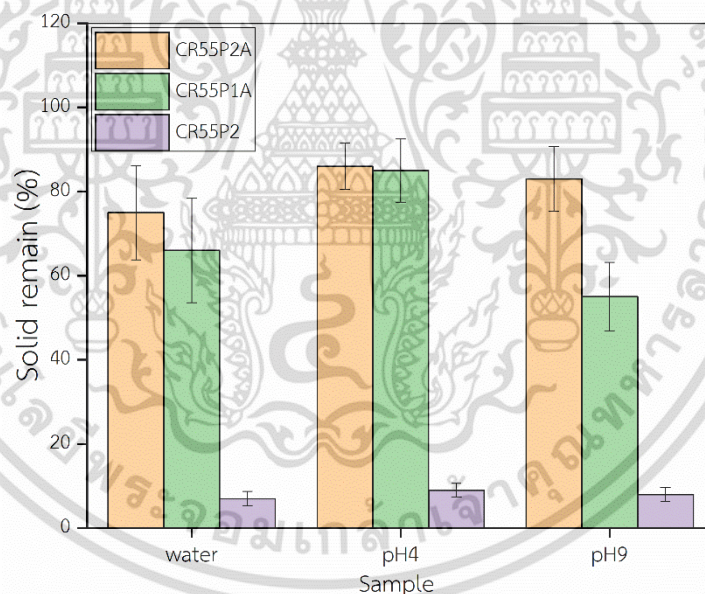
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงพฤติกรรมบวมตัวในสารละลาย; (ก) น้ำ, (ข) บัฟเฟอร์ pH 4 และ

(ค) บัฟเฟอร์ pH 9 ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ร้อยละการดูดซับน้ำในฟิล์มหลังแช่ในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 ร้อยละของแข็งคงเหลือของฟิล์มหลังแช่ในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 9 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

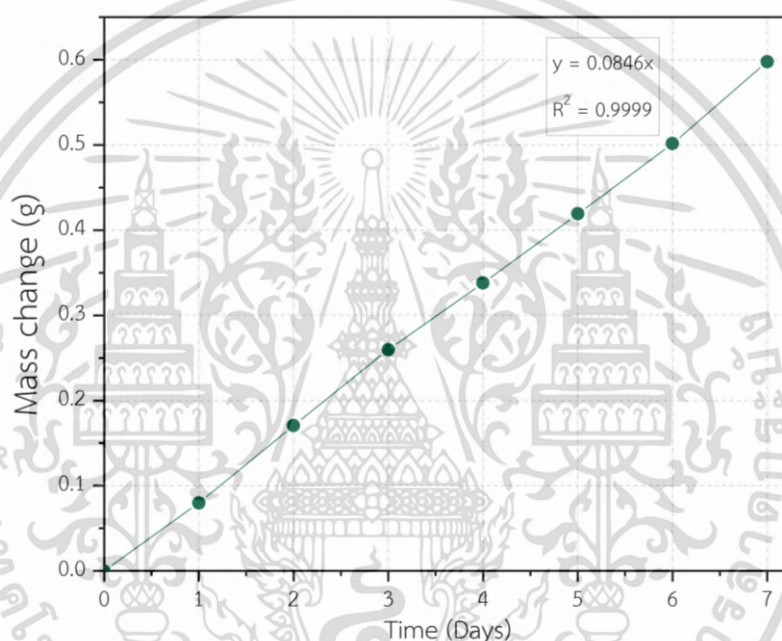
จากผลการทดสอบความแข็งแรงดึง พฤติกรรมการบวมตัว ปริมาณการดูดซับน้ำ และปริมาณของแข็งคงเหลือจึงเลือกฟิล์มสูตร CR55P2A ที่มีความแข็งแรงคงทน และมีการบวมตัวต่ำทนต่อสภาวะกรดอ่อน หรือเบสอ่อนได้ ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช

ในบรรจุภัณฑ์อาหารจึงนำฟิล์มสูตร CR55P2A ไปใช้ในการทดสอบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีค่าเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 ผลการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability; WVP)

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และอายุการเก็บรักษา เนื่องจากการซึมผ่านของไอน้ำจากสภาพแวดล้อมภายนอก หรือ ภายในผ่านผนังของบรรจุภัณฑ์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ได้ ดังนั้นการมีค่า WVP ต่ำถือว่ามีความสามารถในการเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ดี [46-47] การศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำทำได้โดยการหาน้ำหนักของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ฟิล์มสูตรที่นำมาทดสอบ ได้แก่ CR55P2A สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา และหาความชันได้ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับเวลาในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ

จากสมการที่ 3.17 สามารถหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ได้เท่ากับ  $0.2226 \text{ g/day.m}^2$  จากนั้นนำมาคำนวณหาการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ตามสมการที่ 3.18 จะได้ WVP เท่ากับ  $5.26 \times 10^{-11} \text{ g/day.m.Pa}$  เมื่อเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านของไอน้ำระหว่างฟิล์มสูตร CR55P2A และฟิล์มพอลิเมอร์ทั่วไปที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ เช่น HDPE, LDPE, LLDPE เป็นต้น พบว่าฟิล์มสูตร CR55P2A มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างขององค์ประกอบของฟิล์มมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความชอบน้ำจำนวนมาก เช่น  $-O-$ ,  $CO-$ ,  $-OH$  หรือ  $-NH_2$  ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกผ่านโครงสร้างได้ง่าย [48] ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าฟิล์มที่ไม่มีขั้วอย่าง HDPE, LDPE และ LLDPE นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบ ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มสูตร CR55P2A กับฟิล์มที่ชอบน้ำอื่น ๆ ในตารางที่ 4.3 พบว่ามีค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษานี้ฟิล์มสูตร CR55P2A ถือว่ามีค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำเหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์ โดยค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มชนิดต่าง ๆ

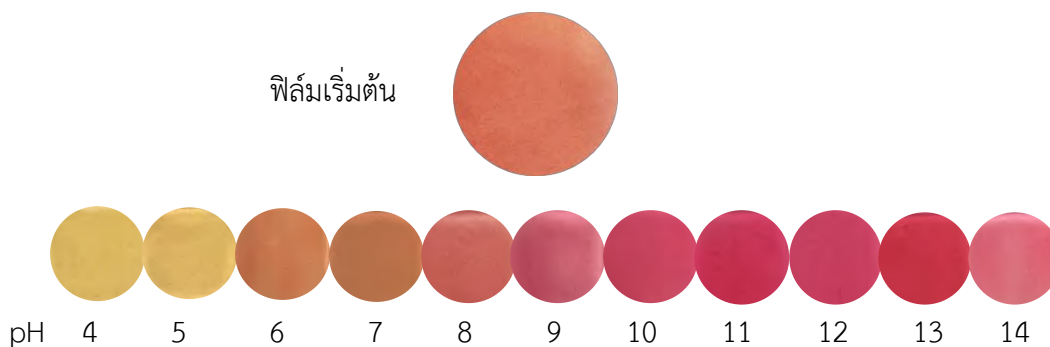
Films		WVP (g/day.m.Pa)	WVP test condition	Reference
Hydrophilic film	CR55P2A	$5.26 \times 10^{-11}$	28°C 75%RH	This work
	CS	$9.36 \times 10^{-11}$	25°C 75%RH	[49]
	CS/Anthocyanin	$1.24 \times 10^{-11}$	20°C 100%RH	[50]
	CS/PVA	$0.98 \times 10^{-10}$	30°C 100%RH	[51]
	TPcr	$1.07 \times 10^{-10}$	20°C 75%RH	[46]
	TSP	$0.39 \times 10^{-9}$	25°C 75%RH	[52]
Hydrophobic film	HDPE	$4.06 \times 10^{-13}$	20°C 75%RH	[46]
	LDPE	$9.54 \times 10^{-13}$	20°C 75%RH	
	LLDPE	$8.42 \times 10^{-13}$	20°C 75%RH	

หมายเหตุ TPcr : Tara gum/PVA/Curcumin film

TSP : Tamarind seed polysaccharide film

#### 4.4.6 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH responsive analysis)

จากการศึกษาการตอบสนองต่อค่าพีเอช โดยการแช่ฟิล์มสูตร CR55P2A ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 14 แล้ววัดเฉดสี และค่าการดูดกลืนแสง ฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนสีตามค่าพีเอชต่าง ๆ เนื่องจากสีย้อมออรินสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลง ซึ่งสีย้อมออรินมีช่วงพีเอชที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเท่ากับ 5 - 6.8 โดยจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดง จากการทดสอบฟิล์มเริ่มต้นเปลี่ยนสีจากสีส้ม-แดงเป็นสีเหลืองในช่วงพีเอช 4 และ 5 และเปลี่ยนเป็นสีส้มจนถึงแดงที่พีเอช 6 - 14 แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 สีของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4-14

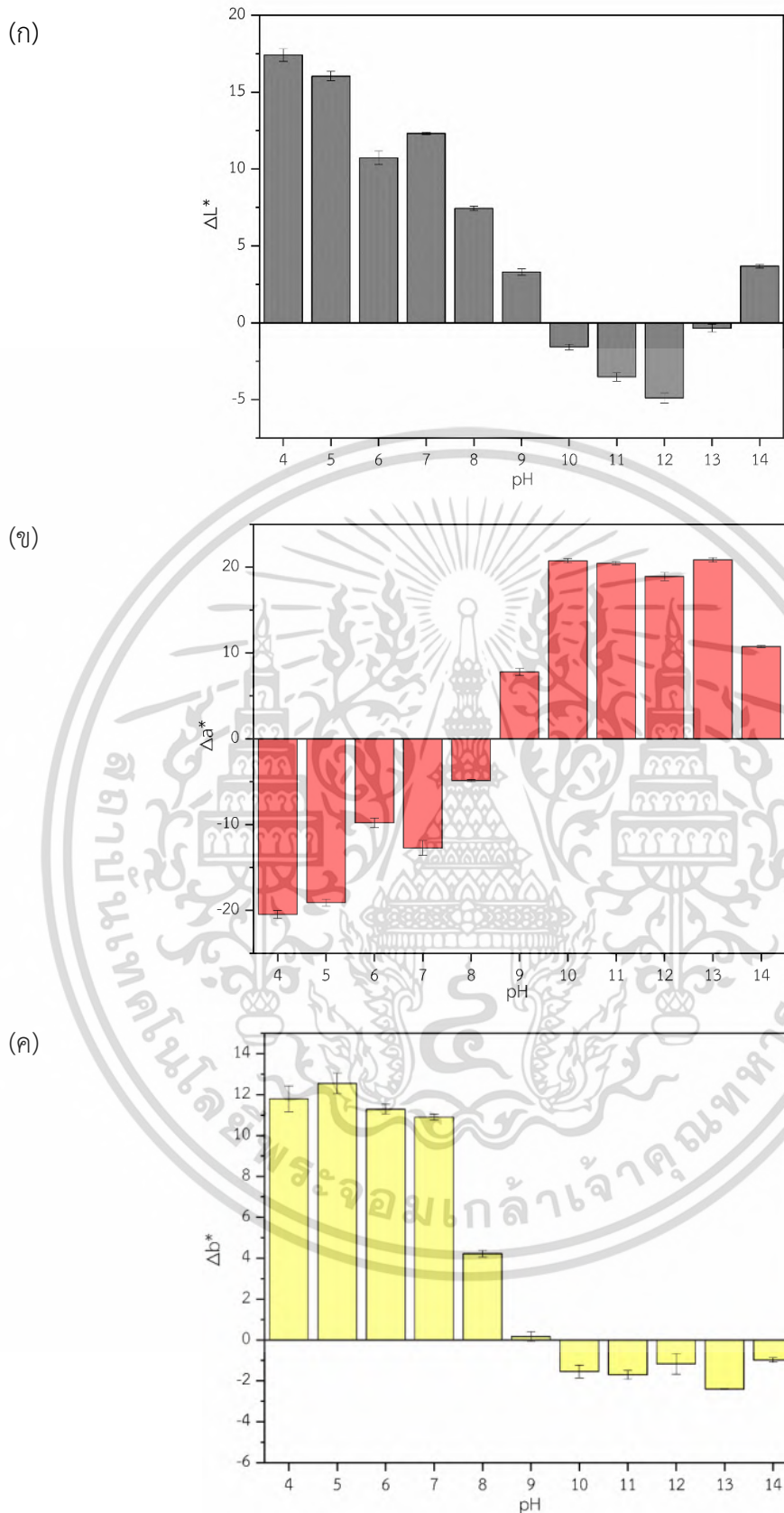
#### 4.4.6.1 ผลการทดสอบการวัดเฉดสี

จากการศึกษาเฉดสีของฟิล์มสูตร CR55P2A เมื่อแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 14 ด้วยเครื่องวัดเฉดสีตามมาตรฐาน D-1925 แสดงผลดังรูปที่ 4.17

จากรูปที่ 4.17 (ก) พบว่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 9 มีค่าเป็นบวก แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีความสว่างหรือมีความใสมากขึ้น และผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 - 13 มีค่าเป็นลบ แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีความสว่างหรือมีความใสน้อยลง แสดงว่ามีความทึบมากขึ้น

จากรูปที่ 4.17 (ข) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) โดยถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าฟิล์มมีเฉดสีแดงมากขึ้น จากการทดสอบเมื่อแช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 14 พบว่าฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 8 มีค่าผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง เป็นค่าติดลบแสดงถึงค่าความเป็นเฉดสีแดงจางลง และมีค่าผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง เป็นบวกเมื่อฟิล์มอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 9 - 14 แสดงถึงฟิล์มมีค่าเฉดสีแดงเข้มขึ้น

จากรูปที่ 4.17 (ค) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) โดยถ้ามีค่าเป็นบวกแสดงว่าฟิล์มมีเฉดสีเหลืองมากขึ้น จากการทดสอบพบว่าฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 - 8 มีผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง เป็นบวกแสดงถึงฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองเข้มขึ้น และเมื่อฟิล์มอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 - 14 มีผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง เป็นค่าติดลบแสดงถึงฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองจางลง



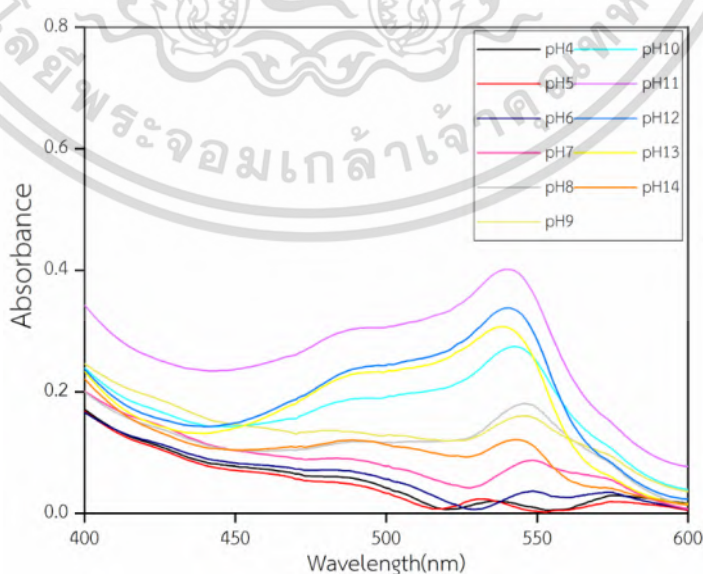
รูปที่ 4.17 ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR5P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อแช่สารละลายบัฟเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) สามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อแช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 – 14 ฟิล์มในช่วงพีเอช 4 -8 มีเฉดสีแดงจางลง และเฉดสีเหลืองเข้มขึ้น ที่พีเอช 9 – 14 ฟิล์มมีเฉดสีแดงเข้มขึ้น และมีเฉดสีเหลืองจางลง แสดงว่า ฟิล์มมีเฉดสีเหลืองที่ค่าพีเอชต่ำ และมีเฉดสีแดงเข้มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น

#### 4.4.6.2 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสง

จากผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร CR55P2A หลังการแช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 – 14 ด้วยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry พบว่าสเปกตรัมของฟิล์มที่อยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 และ 5 พบพีคการดูดกลืนแสงขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 530 นาโนเมตร และสเปกตรัมของฟิล์มหลังการแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 6 - 14 พบพีคการดูดกลืนแสงขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสีย้อมออรินที่ 534 นาโนเมตร [32] แสดงถึง โครงสร้างของสีย้อมออรินที่ต่อกิ่งบน CECS มีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมออริน โดยเมื่อแช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอชที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้แตกต่างกัน เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อมออรินภายในโครงสร้างของ CECS-g-RA ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม เมื่อแช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์ที่พีเอชต่ำฟิล์มมีเฉดสีแดงที่จางกว่า ทำให้ฟิล์มมีค่าความเข้มแสงลดลง และเมื่อแช่ฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอชสูงฟิล์มมีเฉดสีแดงที่เข้มขึ้นทำให้ฟิล์มมีค่าความเข้มแสงที่มากขึ้น โดยกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.18

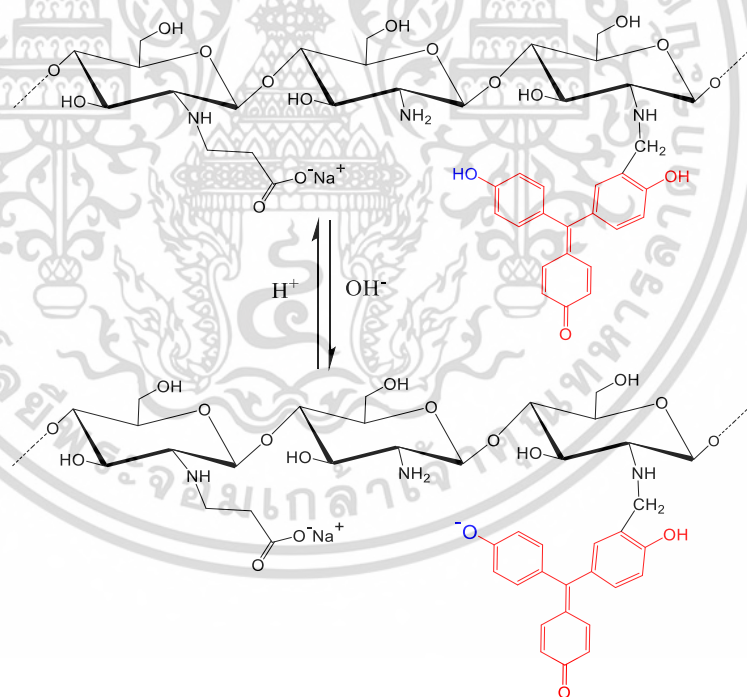


รูปที่ 4.18 กราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4 – 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารร่าง ให้นำไปใช้







#### 4.4.6.3 ผลการทดสอบด้วยไอ

จากการศึกษาการตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มสูตร CR55P2A โดยก่อนการทดสอบนำฟิล์มมาแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 เพื่อให้ฟิล์มเริ่มต้นมีสีเหลือง และเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเมื่อสัมผัสกับไอของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25, 5, 15 และ 30 % (พีเอชของไอเท่ากับ 7, 8, 9, 10 และ 11 ตามลำดับ) โดยฟิล์มจะเปลี่ยนสีตามค่าพีเอชของไอซึ่งจะเปลี่ยนจากสีเหลืองของฟิล์มเริ่มต้นเป็นสีส้มที่พีเอชของไอเท่ากับ 7 และเปลี่ยนเป็นสีส้ม-แดงที่พีเอชเท่ากับ 8 – 11 เนื่องจากภายในฟิล์มมีน้ำเป็นองค์ประกอบทำให้เมื่อไอของแอมโมเนียสัมผัสกับฟิล์ม แอมโมเนียเกิดปฏิกิริยากับน้ำภายในฟิล์มเกิดเป็นแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ส่งผลให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยภายในฟิล์มมี CECS-g-RA ซึ่งมีโครงสร้างของสีย้อมออรินโดยหมู่ฟีนอลในโครงสร้างสามารถเกิดปฏิกิริยากรด-เบสกับไฮดรอกไซด์ไอออนได้ง่ายเกิดเป็นฟีนอกไซด์ไอออน [46] ดังรูปที่ 4.19 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นหรือค่าพีเอชของไอเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มใช้เวลาในการเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม-แดงได้เร็วขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของไอที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของสีย้อมออรินในโครงสร้างของ CECS-g-RA

ตารางที่ 4.4 สีของฟิล์ม และเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มเมื่อสัมผัสไอของแอมโมเนีย

ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย (%)	ค่าพีเอชของไอ	รูปสีของฟิล์ม	เวลาที่ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสี
0.00	-		-
0.10	7		4 ชั่วโมง
0.25	8		1.30 ชั่วโมง
5.00	9		30 นาที
15.00	10		15 นาที
30.00	11		5 นาที

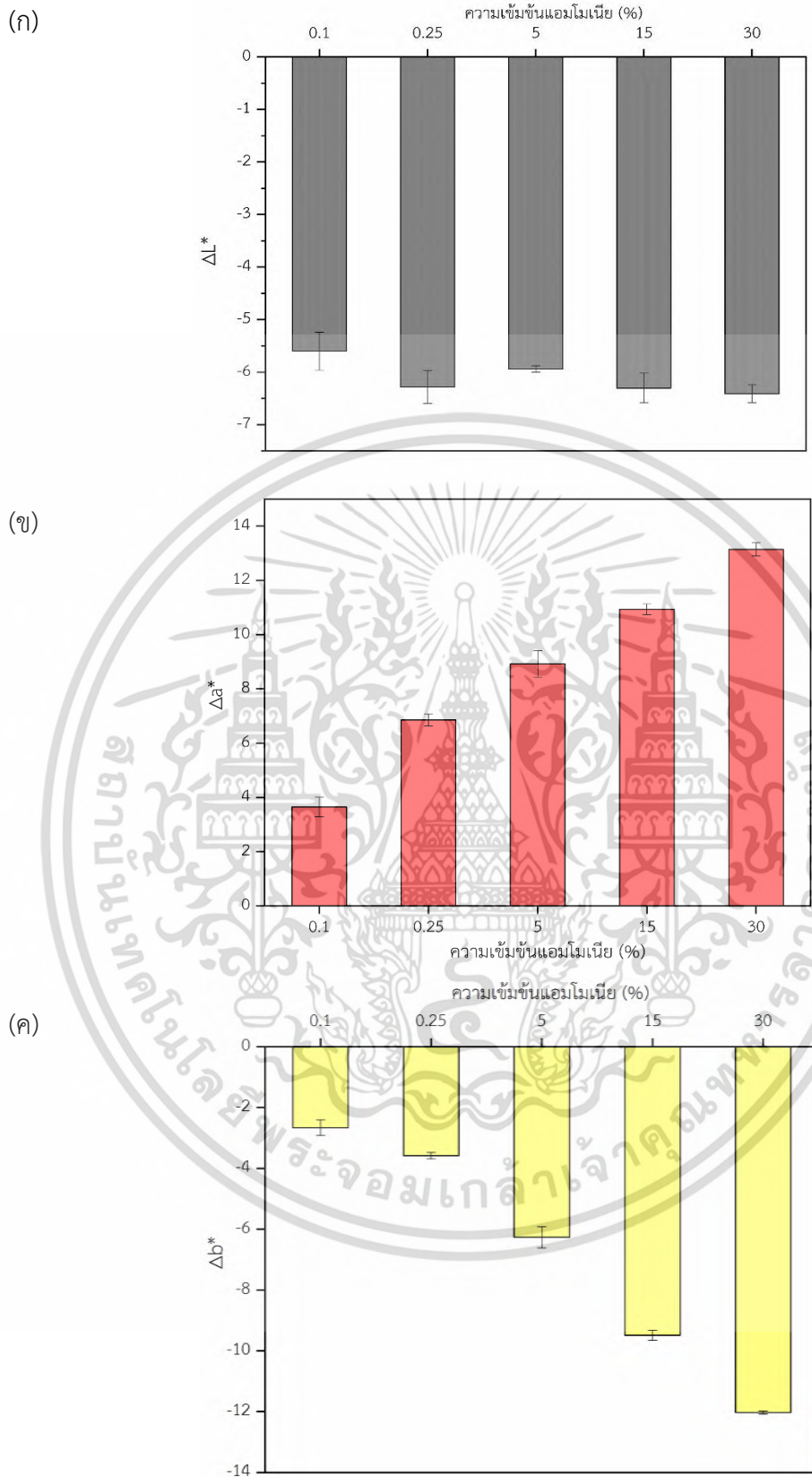
จากการศึกษาเฉดสีของฟิล์มสูตร CR55P2A เมื่อสัมผัสกับไอของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25, 5, 15 และ 30 % ด้วยเครื่องวัดเฉดสีตามมาตรฐาน D-1925 แสดงผลดังรูปที่ 4.20

จากรูปที่ 4.20 (ก) พบว่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มเมื่อสัมผัสกับไอของแอมโมเนียมีค่าเป็นลบ แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีความสว่างหรือมีความใสลดลง และมีความทึบมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียผลต่างของค่าความสว่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.20 (ข) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นหรือค่าพีเอชสูงขึ้นส่งผลให้ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดงมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีเฉดสีแดงเข้มขึ้น

จากรูปที่ 4.20 (ค) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากการทดสอบพบว่าผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง เป็นลบแสดงถึงฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองจางลง และเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมากขึ้นหรือค่าพีเอชสูงขึ้น มีผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลืองเป็นลบมากขึ้นแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองที่จางลงเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมากขึ้น

จากค่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) สามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อฟิล์มสัมผัสกับไอของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25, 5, 15 และ 30 % ฟิล์มเปลี่ยนจากเฉดสีเหลืองเป็นเฉดสีแดงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียเพิ่มขึ้น

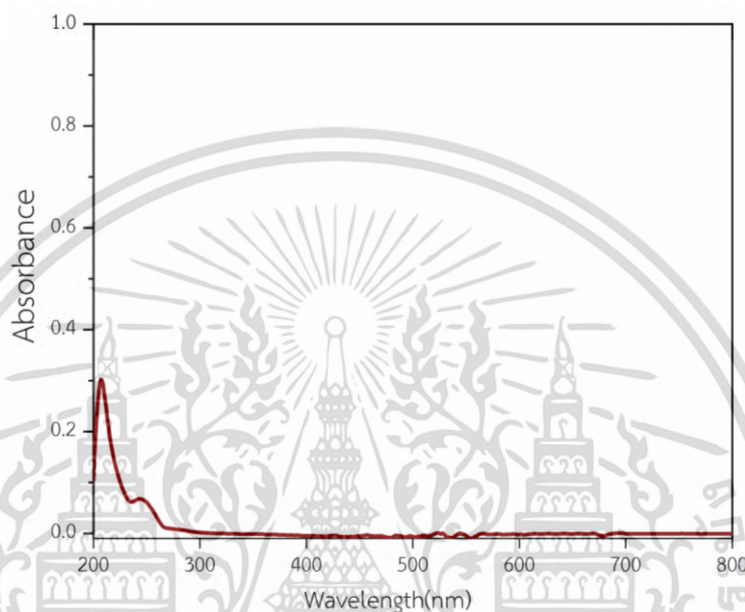


**รูปที่ 4.20** ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR55P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อสัมผัสไอของแอมโมเนีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.7 ผลการทดสอบการหลุดออกของสี้อม

จากการศึกษาการหลุดออกของสี้อมออรีน โดยการนำฟิล์มสูตร CR55P2A แช่ในเอทานอลที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นวัดการดูดกลืนแสงของเอทานอลหลังแช่ฟิล์มที่ความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตรด้วยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry แสดงผลดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟการดูดกลืนของเอทานอลหลังแช่ฟิล์ม 48 ชั่วโมง

จากรูป 4.21 ไม่พบพีคการดูดแสงที่ความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของสี้อมออรีน แสดงถึงไม่พบการหลุดออกของสี้อมออรีน แต่เนื่องจากในการสังเคราะห์ CECS-g-RA ด้วยปฏิกิริยาแมนนิชเป็นการต่อสี้อมออรีนบนสายโซ่ของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานเกิดการเชื่อมต่อกันด้วยหมู่เมทิลีน (Methylene bridge;  $-\text{CH}_2-$ ) ระหว่างหมู่อะมิโนของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน และตำแหน่งออโรโทของสี้อมออรีนซึ่งเป็นการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง ส่งผลให้สี้อมติดอยู่บนโครงสร้างของพอลิเมอร์และเกิดการหลุดออกได้ยากทำให้เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มจึงไม่พบการหลุดออกของสี้อม ฟิล์มที่เตรียมได้จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าสี้อมออรีนอิสระจะสามารถละลายได้ดีในเอทานอล แต่ฟิล์มที่เตรียมได้ไม่เกิดการบวมตัวในเอทานอลทำให้เอทานอลไม่สามารถแทรกเข้าไปในเนื้อฟิล์มได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการชะสี้อมอิสระกรณีตกค้างอยู่ภายในเนื้อฟิล์มลดลง ผลที่ได้จึงไม่อาจสรุปได้แน่ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.8 ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay

จากการศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay ของฟิล์มสูตร CR64P2A, CR55P2A และ CR46P2A พบว่ามี %cell viability อยู่ในช่วง 102 - 112 ซึ่งมีความมากกว่า 70% แสดงถึงฟิล์มทั้ง 3 สูตรไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ตามมาตรฐาน ISO 10993-5 [53] ซึ่งค่า Cell viability มีความมากกว่า 100% เนื่องจากเซลล์ที่ทดสอบมีการเจริญเติบโตเพิ่มมากขึ้น โดยค่าเปอร์เซ็นต์ Cell viability เฉลี่ยของฟิล์มแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเปอร์เซ็นต์ Cell viability เฉลี่ยของฟิล์ม

สูตร	%Cell viability
CR64P2A	111.8
CR55P2A	107.6
CR46P2A	102.4

จากผลการทดสอบการหลุดออกของสีย้อม และความเป็นพิษต่อเซลล์ พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ไม่พบการหลุดออกของสีย้อม อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อเซลล์ (ซึ่งมีรายงานความเป็นพิษต่อเซลล์สิ่งมีชีวิตของสีย้อมออริโน) [54] เนื่องจากองค์ประกอบของฟิล์มตัวอย่าง ได้แก่ อนุพันธ์ของโคโตะซาน และอัลจินต เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมีความเข้ากันได้กับเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) ทำให้ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์หรืออันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารต่อไปได้











#### 4.4.9 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชกับตัวอย่างอาหาร


การทดสอบการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชกับตัวอย่างอาหาร โดยฟิล์มที่ใช้ทดสอบได้แก่ สูตร CR55P2A ทดสอบในตัวอย่างอาหาร 2 ชนิด คือ ตัวอย่างนมพลาสเจอร์ไรซ์ และตัวอย่างเนื้อปลา เพื่อบ่งบอกการเน่าเสียของตัวอย่างอาหารเมื่อฟิล์มตอบสนองต่อค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป

##### 4.4.9.1 ผลการทดสอบในตัวอย่างนมพลาสเจอร์ไรซ์

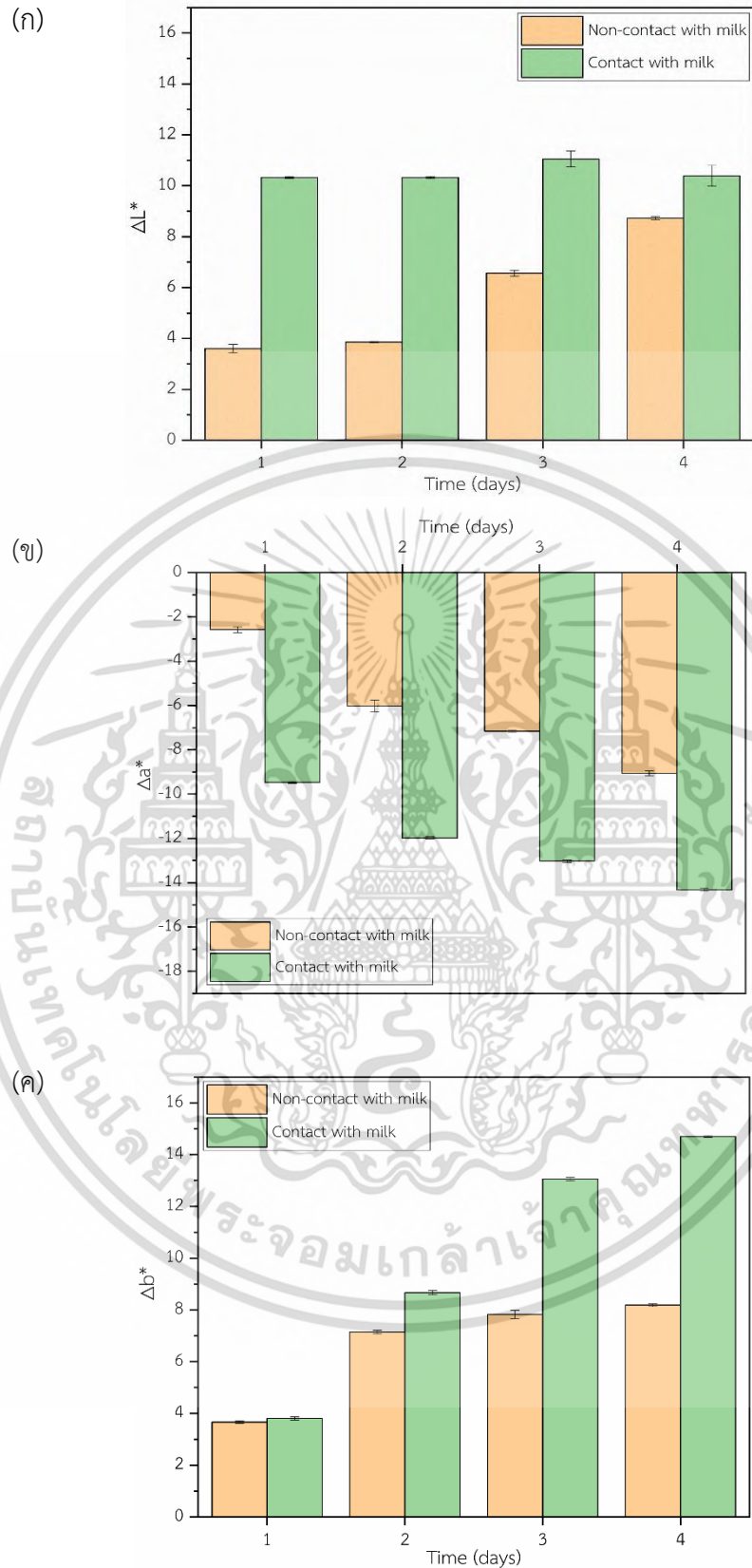
การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มจากการเน่าเสียของตัวอย่างนมพลาสเจอร์ไรซ์ โดยให้ฟิล์มสูตร CR55P2A สัมผัส และไม่สัมผัสตัวอย่างนมพลาสเจอร์ไรซ์ (ฟิล์มเริ่มต้นมีค่าพีเอชเป็นกลาง) โดยวัดเจดสี และวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์ม อีกทั้งวัดค่าพีเอชของนมพลาสเจอร์ไรซ์ พร้อมทั้งคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นกรด (%Acidity) แสดงผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพีเอช เปอร์เซ็นต์ความเป็นกรดของตัวอย่างนมพลาสเจอไรซ์

เวลา (วัน)	pH	% Acidity	รูปฟิล์มที่ไม่ได้สัมผัสนม	รูปฟิล์มที่สัมผัสนม
0	6.74±0.04	0.1791		
1	6.51±0.04	0.1835		
2	6.44±0.02	0.2687		
3	5.85±0.06	0.3537		
4	5.22±0.07	0.4522		

หมายเหตุ  คือรูปการเปรียบเทียบสีของฟิล์มระหว่างสีฟิล์มเริ่มต้น (ซ้าย) กับสีฟิล์มที่เวลาต่างๆ (ขวา)

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าพีเอชของนมพลาสเจอไรซ์มีค่าลดลงจาก 6.74 เป็น 5.22 และค่า %Acidity เพิ่มขึ้นจาก 0.1791 เป็น 0.4522 เนื่องจากกระบวนการเน่าเสียของนม เกิดจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ และการสะสมของกรดแลคติกจากกระบวนการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ [7, 55] ส่งผลให้เมื่อเวลาผ่านไปนมเกิดการเน่าเสียค่าพีเอชของนมจึงลดลง และ %Acidity จากการสะสมของกรดแลคติกเพิ่มขึ้น โดยนมปกติมีค่าพีเอชประมาณ 6.7 และมีค่า %Acidity อยู่ในช่วง 0.16 – 0.18% [56] เมื่อนมเกิดการเน่าเสียจะมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 และมีค่า %Acidity มากกว่า 0.18 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ตัวอย่างนมมีค่าพีเอชลดลง โดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.51 และ 6.44 และมีค่า %Acidity เพิ่มขึ้นเป็น 0.1835 และ 0.2687 ที่เวลา 1- 2 วัน แสดงว่าตัวอย่างนมเริ่มเกิดการเน่าเสียเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และเกิดการเน่าเสียอย่างสมบูรณ์ที่เวลา 2 วัน และจากการวัดเฉดสีของฟิล์มที่ใช้ทดสอบการเน่าเสียของตัวอย่างนมแสดงผลดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR55P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อทดสอบด้วยตัวอย่างนมพลาสติกเจอไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

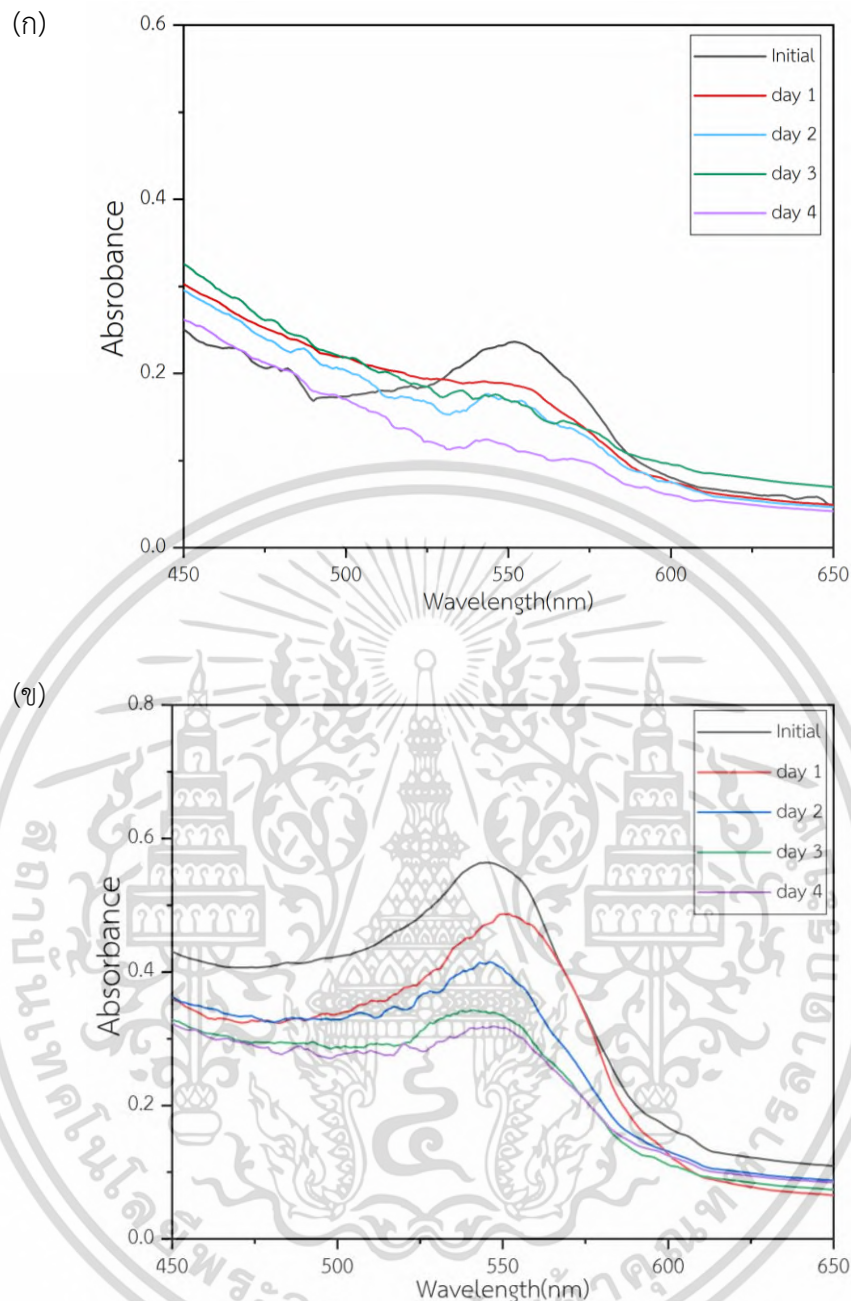
จากรูปที่ 4.22 (ก) พบว่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มเมื่อทดสอบการเนาเสียของนมพลาสเจอไรซ์มีค่าเป็นบวก แสดงว่าฟิล์มที่ได้มีความสว่างหรือมีความใสมากขึ้น และมีความทึบลดลง โดยฟิล์มที่สัมผัสกับตัวอย่างนมเมื่อเวลามากขึ้นมีผลต่างของค่าความสว่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และฟิล์มที่ไม่สัมผัสกับตัวอย่างนมเมื่อเวลามากขึ้นมีผลต่างของค่าความสว่างเป็นบวกเพิ่มขึ้นแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีความสว่างหรือมีความใสมากขึ้น และมีความทึบลดลง

จากรูปที่ 4.22 (ข) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดงมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีเฉดสีแดงลดลง โดยเกิดเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งฟิล์มที่สัมผัส และไม่สัมผัสตัวอย่างนม

จากรูปที่ 4.22 (ค) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากการทดสอบพบว่าผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง เป็นบวกแสดงถึงฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองเข้มขึ้น และเมื่อเวลามากขึ้นมีผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลืองเป็นบวกมากขึ้นแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองเข้มขึ้น โดยเกิดเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งฟิล์มที่สัมผัส และไม่สัมผัสตัวอย่างนม

จากค่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) สามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อเวลาในการทดสอบมากขึ้นฟิล์มที่ได้มีเฉดสีแดงลดลง และมีเฉดสีเหลืองเข้มขึ้น การเนาเสียของตัวอย่างนมเกิดจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์และการสะสมของกรดแลคติกจากกระบวนการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้ค่าพีเอชของตัวอย่างนมลดลงทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสี จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อมออริบอินโครสร้างของ CECS-g-RA ภายในฟิล์ม โดยฟิล์มที่สัมผัสนมตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนสีได้ชัดเจนกว่า เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อมต้องอาศัยความชื้น ทำให้ฟิล์มที่สัมผัสกับนมโดยตรงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้ง่ายกว่าฟิล์มที่ไม่ได้สัมผัสนม โดยฟิล์มที่ไม่ได้สัมผัสตัวอย่างนมมีเฉดสีแดงที่จางลง และสีของฟิล์มที่สัมผัสกับตัวอย่างนมเปลี่ยนจากเฉดสีแดงเป็นเฉดสีเหลืองใช้เวลา 1-2 วัน แสดงถึงการเนาเสียของตัวอย่างนม สีของฟิล์มแสดงดังรูปในตารางที่ 4.6

ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจากการเนาเสียของตัวอย่างนมพลาสเจอไรซ์ แสดงดังรูปที่ 4.23 เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มหลังการทดสอบการเนาเสียของตัวอย่างนมที่เวลาต่าง ๆ พบค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมออริบอินโครสร้างของ CECS-g-RA ที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร และเมื่อเวลาผ่านไป 1-2 วัน ตัวอย่างนมเริ่มเกิดการเนาเสียค่าพีเอชของนมลดลง ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสี โดยฟิล์มที่ไม่ได้สัมผัสตัวอย่างนมมีเฉดสีแดงที่จางลง และสีของฟิล์มที่สัมผัสกับตัวอย่างนมเปลี่ยนจากเฉดสีแดงเป็นเฉดสีเหลือง ส่งผลให้มีค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มมีค่าความเข้มแสงลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยเกิดเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งฟิล์มที่สัมผัส และไม่สัมผัสนมตัวอย่างนม



รูปที่ 4.23 กราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์ม; (ก) สัมผัสตัวอย่างนาน และ (ข) ไม่สัมผัสตัวอย่างนาน

จากการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชที่เกิดจากการเน่าเสียของตัวอย่างนมพลาสเจอไรซ์สามารถสรุปได้ว่าเมื่อนมเกิดการเน่าเสียภายในเวลา 1-2 วัน จากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ และการสะสมของกรดแลคติกจากกระบวนการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้ค่าพีเอชของนมลดลง ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสี โดยฟิล์มที่สัมผัสนมเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนซึ่งเปลี่ยนจากเฉดสีแดงเป็นเฉดสีเหลือง และมีค่าการดูดกลืนแสงลดลง ดังนั้นฟิล์มสูตร CR55P2A สามารถบ่งบอกการเน่าเสียของนมพลาสเจอไรซ์ได้จากการเปลี่ยนสีของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.9.2 ผลการทดสอบในตัวอย่างเนื้อปลา

การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มจากการเน่าเสียของเนื้อปลา ทดสอบโดยการวัดเจดสีของฟิล์ม โดยปกติการเน่าเสียของปลาเกิดจากการสลายตัวของโปรตีนด้วยเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวปลา (Autolysis) ก่อให้เกิดสารระเหยไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ไตรเมทิลเอมีน และ ไดเมทิลเอมีน เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้ค่าพีเอชสูงขึ้น [57-59] โดยก่อนการทดสอบนำฟิล์มสูตร CR55P2A แช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 เพื่อให้สีฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนเมื่อสัมผัสกับสารระเหยไนโตรเจน จากการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มจากการเน่าเสียของเนื้อปลา พบว่าฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม-แดงเมื่อเวลาผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ CECS-g-RA ภายในฟิล์ม การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 สีของฟิล์ม CR55P2A ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบการเน่าเสียของเนื้อปลา

จากตารางที่ 4.7 ค่าความแตกต่างของเจดสี ( $\Delta E$ ) คำนวณได้จากสมการที่ 3.23 โดยทั่วไปถ้าค่าความแตกต่างของเจดสีมีค่ามากกว่า 5 หมายถึง สามารถเห็นความแตกต่างของเจดสีได้ด้วยตามนุษย์ และถ้ามีค่ามากกว่า 12 หมายถึง มีความแตกต่างของเจดสีอย่างชัดเจน [60] จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแตกต่างของเจดสีเพิ่มขึ้นเป็น 10.32 และ 16.54 เมื่อเวลาผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม-แดง เมื่อค่าพีเอชจากสารระเหยไนโตรเจนจากกระบวนการเน่าเสียของปลาเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการเน่าเสียของปลา

ตารางที่ 4.7 ค่าความแตกต่างของเฉดสีของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบการเน่าเสียของเนื้อปลา

Time (h)	$\Delta E$
0	-
1	1.76±0.83 <sup>d</sup>
2	2.44±0.92 <sup>cd</sup>
4	3.84±0.77 <sup>cd</sup>
8	4.62±1.01 <sup>c</sup>
24	10.32±1.34 <sup>b</sup>
48	16.54±0.74 <sup>a</sup>

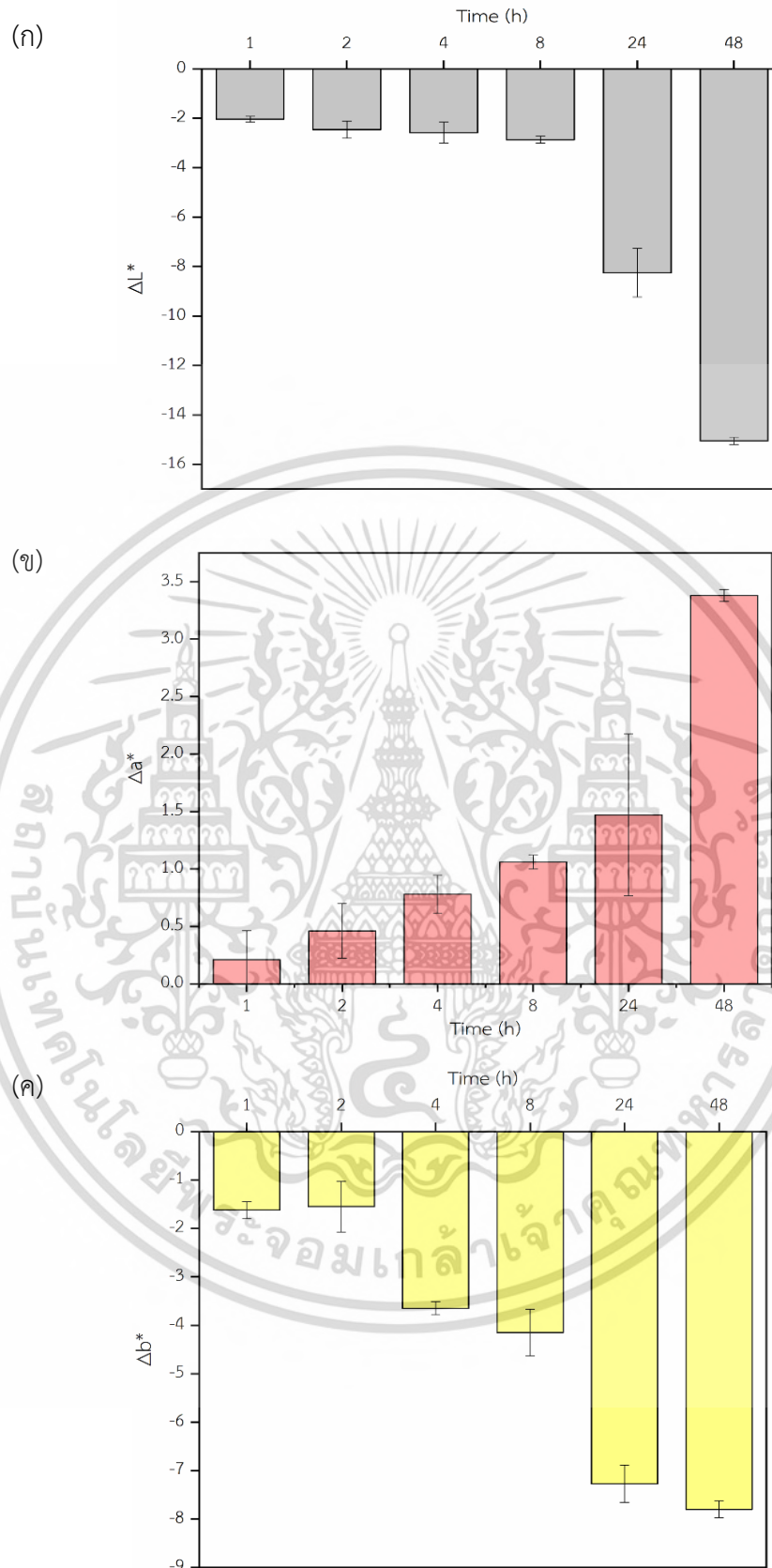
จากการศึกษาเฉดสีของฟิล์มสูตร CR55P2A เมื่อทดสอบการเน่าเสียของเนื้อปลาด้วยเครื่องวัดเฉดสีตามมาตรฐาน D-1925 แสดงผลดังรูปที่ 4.25

จากรูปที่ 4.25 (ก) แสดงผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มเมื่อทดสอบการเน่าเสียของปลาพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นผลต่างของค่าความสว่างมีค่าเป็นลบมากขึ้น แสดงถึงความสว่างหรือความใสของฟิล์มลดลง และมีความทึบมากขึ้น

จากรูปที่ 4.25 (ข) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) ของฟิล์มเมื่อทดสอบการเน่าเสียของปลาพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดงมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นแสดงว่าฟิล์มที่ได้มีเฉดสีแดงเข้มขึ้น

จากรูปที่ 4.25 (ค) แสดงผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง เป็นลบแสดงถึงฟิล์มที่ได้มีเฉดสีเหลืองจางลง

จากค่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) สามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อฟิล์มสัมผัสกับสารระเหยไนโตรเจนจากกระบวนการเน่าเสียของปลา ฟิล์มเปลี่ยนจากเฉดสีเหลืองเป็นเฉดสีแดงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น



**รูปที่ 4.25** ค่าเฉดสีของฟิล์ม CR5P2A (ก) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข) ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ), และ (ค) ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) เมื่อทดสอบด้วยตัวอย่างเนื้อปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชที่เกิดจากการเน่าเสียของเนื้อปลา สามารถสรุปได้ว่าการเน่าเสียของปลาเกิดจากการสลายตัวของโปรตีนด้วยเอนไซม์ที่มีอยู่ในตัวปลา ก่อให้เกิดสารระเหยไนโตรเจน ซึ่งส่งผลให้ค่าพีเอชสูงขึ้น ทำให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม-แดง จากค่าความแตกต่างของเฉดสีของฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง มีค่ามากกว่า 5 และ 12 แสดงถึงฟิล์มมีการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนเมื่อเกิดการเน่าเสียของเนื้อปลา ดังนั้นฟิล์มสูตร CR55P2A สามารถบ่งบอกการเน่าเสียของเนื้อปลาได้จากการเปลี่ยนสีของฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุที่ตอบสนองต่อค่าพีเอช โดยการต่อกิ่งสีย้อมออริโนบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานผ่านปฏิกิริยาแมนนิช โดยปฏิกิริยาจะเกิดการเชื่อมต่อกันด้วย Methylene bridge ที่ตำแหน่งหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซานและตำแหน่งออร์โทของสีย้อมออริโน และทำการเตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจากคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริโน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิโดซัลฟิเนต ด้วยกระบวนการหล่อและระเหยสาร โดยออกซิโดซัลฟิเนตทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงทางชีวภาพ จากโครงสร้างของออกซิโดซัลฟิเนตมีหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาชิฟเบสที่ตำแหน่งหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของ CECS และ CECS-g-RA เกิดเป็นพันธะอิมีน (Imine) และจากโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนกับทุกองค์ประกอบภายในฟิล์มได้

#### การพิสูจน์เอกลักษณ์

การสังเคราะห์ออกซิโดซัลฟิเนตได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว และมีผลผลิตร้อยละอยู่ในช่วง 70-80 สามารถคำนวณหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันแอลดีไฮด์เฉลี่ยได้เท่ากับ 5.7 มิลลิโมลต่อกรัม การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  พบสัญญาณโปรตอนที่แตกต่างกันออกไปจากสิ่งแวดล้อมเดิมของโซเดียมซัลฟิเนต สรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์ออกซิโดซัลฟิเนตได้

การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายน้ำได้ดี โดยมีผลผลิตร้อยละในช่วง 85-90 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  เมื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์การแทนที่พบว่ามีความเท่ากับ 40%

การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลโคโตซานต่อกิ่งด้วยสีย้อมออริโนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีแดงสามารถละลายน้ำได้ การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  เมื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์การแทนที่พบว่ามีความเท่ากับ 0.19%

#### การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์ม

จากการเตรียมฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชจาก CECS, CECS-g-RA, PVA และ OSA พบว่าการใช้ OSA ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงทางชีวภาพ และการเกิดพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลของแต่ละองค์ประกอบส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความคงทนมากขึ้นสามารถทนตัวทำละลายน้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดอ่อน และเบสอ่อนได้ โดยฟิล์มมีค่าการดูดซับน้ำอยู่ในช่วง 389 - 413% และมีค่าร้อยละปริมาณของแข็งคงเหลือของฟิล์มไม่ต่ำกว่า 70%

สำหรับสมบัติเชิงกลของฟิล์มพบว่าฟิล์มที่มีสัดส่วนของ CECS-g-RA และความเข้มข้นของ PVA สูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และร้อยละการดึงยืดสูงขึ้นเนื่องจากสามารถเกิดการเชื่อมโยง 2 ระบบจากพันธะไฮโดรเจน และพันธะไฮโดรเจน

การตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มสูตร CR55P2A พบว่าฟิล์มเปลี่ยนสีในเขตสีเหลืองถึงสีส้ม-แดง จากการทดสอบฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในช่วงพีเอช 4 และ 5 และเปลี่ยนเป็นสีส้ม-แดงที่พีเอช 6 - 14

ค่าการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม เท่ากับ  $5.26 \times 10^{-11}$  g/day.m.Pa นอกจากนี้พบว่าฟิล์มไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ และคงทนต่อการหลุดออกของสีย้อม แสดงว่าการสังเคราะห์ CECS-g-RA ด้วยปฏิกิริยาแมนนิชเป็นการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความเสถียร

### การทดสอบการประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชกับตัวอย่างอาหาร

จากการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มจากการเน่าเสียของตัวอย่างนมพลาสเจอไรซ์ เมื่อนมเกิดการเน่าเสียภายในเวลา 1 - 2 วัน จากการสะสมของกรดแลคติกทำให้ค่าพีเอชของนมลดลง %Acidity สูงขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสี โดยฟิล์มที่สัมผัสนมเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนซึ่งเปลี่ยนจากเขตสีแดงเป็นเขตสีเหลือง และมีค่าการดูดกลืนแสงลดลง

จากการทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของฟิล์มจากการเน่าเสียของเนื้อปลา พบว่าค่าความแตกต่างของเขตสี ( $\Delta E$ ) เพิ่มขึ้นเป็น 10.32 และ 16.54 เมื่อเวลาผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง ฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองเป็นสีส้ม-แดงเมื่อค่าพีเอชจากสารระเหยไนโตรเจนจากกระบวนการเน่าเสียของปลาเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการเน่าเสียของเนื้อปลา

จากผลการทดสอบข้างต้นสรุปได้ว่าฟิล์มที่ตอบสนองต่อค่าพีเอชที่เตรียมได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อบ่งบอกคุณภาพของอาหารเมื่อเกิดการเน่าเสียจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไปเป็นกรดในกรณีของนม และเบสในกรณีของเนื้อปลาได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) หาค่า Total volatile base nitrogen (TVB-N) เพื่อบ่งบอกการเน่าเสียของปลาตามมาตรฐาน EU 95/149/EEC และใช้ประกอบกับข้อมูลพีเอช และการเปลี่ยนสีของฟิล์ม
- 2) ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และชนิดของปลาที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อเวลาในการเน่าเสียของปลา และชนิดของปลาที่มีกระบวนการเน่าเสียที่ต่างกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wells, N. Yusufu, D. and Mills, A. 2018. "Colourimetric plastic film indicator for the detection of the volatile basic nitrogen compounds associated with fish spoilage." *Talanta*. 18 : 31171-8.
- [2] Schyrr, B. Pasche, S. Scolan, E. Ischer, R. , Ferrario, D. , Porchet, J.A. and Voirin G. 2013. "Development of a polymer optical fiber pH sensor for on-body monitoring application." *Sensors and Actuators B*. 194 : 238-248.
- [3] Pakolpakcil, A. Karaca, E. and Becerir, B. 2018. "Investigation of a Natural pH-Indicator Dye for Nanofibrous Wound Dressings." **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 460.**
- [4] Yang, C.H. Wang, M.X. Haider, H. Yang, J.H. Sun, J.Y. Chen, Y.M. Zhou, J. and Suo, Z. 2018. "Strengthening Alginate/Polyacrylamide Hydrogels Using Various Multivalent Cations." *ACS Applied Materials & Interfaces* 5 : 10418-10422.
- [5] Agarwal, A. Raheja, A. Natarajan, T.S. and Chandra, T.S. 2012 "Development of universal pH sensing electrospun nanofibers." *Sensors and Actuators B* 161 : 1097-1101.
- [6] Vo, T.V. Dang, T.H. and Chen, B.H. 2019 "Synthesis of Intelligent pH Indicative Films from Chitosan/Poly(vinyl alcohol)/Anthocyanin Extracted from Red Cabbage." *Polymers* 11(7) : 1088.
- [7] Pereira Jr., V.A. Arruda, I.N.Q. and Stefani, R. 2015 "Active chitosan/PVA with anthocyanins from *Brassica oleraceae* (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for application in intelligent food packaging." *Food Hydrocolloids* 43 : 180-188.
- [8] Liu, L. Li, X. Nagao, M. Elias, A. L. Narain, R. and Chung, H.J. 2017. "A pH-Indicating Colorimetric Tough Hydrogel Patch towards Applications in a Substrate for Smart Wound Dressings." *Polymers* 9(11) : 558.
- [9] Zhang, L. Li, Z. Chang, R. Chen, Y. and Zhang, W. 2009. "Synthesis and characterization of novel phenolphthalein immobilized halochromic fiber." *Reactive & Functional Polymers*. 69 : 234-239.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Chalitangkoon, J. and Monvisade, P. 2019. “Dual pH/thermal-dependent coloring polymeric dye through mannich reaction of chitosan: Synthesis and characterization.” *Carbohydrate Polymers* 223 : 115049.
- [11] Revolvly. 2019 **pH indicator** [Online]. Available : <https://www.revolvly.com/page/PH-indicator?cr=1>
- [12] Revolvly. 2019. **Halochromism**. [Online]. Available : <https://www.revolvly.com/page/Halochromism>
- [13] Choi, I. Lee, J.Y. Lacroix, M. and Han, J.J. 2017 “Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato.” *Food Chemistry* 218 : 122-128.
- [14] Qin, M. Guo, H. Zhang, D. Xu, Y. and Xin, N. 2019. “Advances in flexible and wearable pH sensors for wound healing monitoring.” *Journal of semiconductors*. 40 : 111607.
- [15] ไคติน-ไคโตซาน. 2556. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://guru.sanook.com/2511/>
- [16] สิริวรรณ พัฒนาฤดี. 2555. ผลของสารเชื่อมขวางในสารเคลือบผิวไคโตซานสำหรับกระดาษ. (รายงานผลการวิจัย). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] Ashenhurst, J. 2019. **1,4-addition of enolates to enones (“The Michael Reaction”)** [Online]. Available : <https://www.masterorganicchemistry.com/reaction-guide/14-addition-of-enolates-to-enones-the-michael-reaction/>
- [18] BYJUS. 2019. **Michael addition mechanism**. [Online]. Available : <https://byjus.com/chemistry/michael-addition-mechanism/>
- [19] Yamamori, N. Ichinose, Y. Sunamoto, J. and Aiba, S.I. 2003. “Michael Reaction of Chitosan with Acrylic Acid in Water.” *Macromolecular Bioscience*. 3 : 231-233.
- [20] กฤตกานต์ มณีวงศ์วิโรจน์. 2552. การศึกษาสมบัติของวัสดุที่เตรียมได้จากอนุพันธ์ของยางธรรมชาติและไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [21] โชคชัย วนภู 2554. การผลิตอัลจินตโดยเชื้อ *Azotobacter vinelandii* และการประยุกต์ใช้ในการตรึงเอนไซม์เพื่อการอุตสาหกรรม. (รายงานผลการวิจัย) สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] Phillips, G.O. and Williams, P.A. 2000. **Handbook of hydrocolloids**. New York : CRC Press.
- [23] Simo, G. Fernandez, E.F. Crespo, J.V. Ruiperez, V. Nogales, J.M.R. 2017 “Research progress in coating techniques of alginate gel polymer for cell encapsulation.” *Carbohydrate Polymers*. 170 : 1-14.
- [24] Gomez, C.G. Rinaudo, M. and Villar, M.A. 2006 “Oxidation of sodium alginate and characterization of the oxidized derivaives.” *Carbohydrate Polymers*. 67 : 296-304.
- [25] Ashenhurst, J. 2019. **Introduction to Oxidative Cleavage Reactions**. [Online]. Available : <https://www.masterorganicchemistry.com/2011/11/01/introduction-to-oxidative-cleavage-reactions/>
- [26] Chemistry score. 2019. **Oxidative cleavage of vicinal diols**. . [Online]. Available : <https://www.chemistryscore.com/reactions/oxidative-cleavage-vicinal-diols/>
- [27] Ding, W. Zhou, J. Zeng, Y. Wang, Y. and Shi, B. 2017 “Preparation of oxidized alginate with different molecular weights and its application for crosslinking collagen fiber.” *Carbohydrate Polymers*. 157 : 1650-1656.
- [28] Chen, F. Tian, M. Zhang, D. Wang, J. Wang, Q. Yu, X. Zhang, X. and Wan, C. 2012 “Preparation and characterization of oxidized alginate covalently crooslinked galactosylated chitosan scaffold for liver tissue engineering.” *Materials Science and Engineering C*. 32 : 310-320.
- [29] พรหม ภัทธีธรรม 2560 **การเตรียมโคโตซาน/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจล**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [30] Majewski, L.A. 2005. “Alternative Gate insulators for Organic Field-Effect Transistors.” A thesis submitted to the University of Sheffield for Ph.D. of Philosophy in the subject of Physic.
- [31] วรเวทย์ กาญจนานันท์. 2555. **ผลของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ต่อสมบัติของฟิล์มและการยึดติดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [32] ChemicalBook. 2017. **Material Safety Data Sheet Rosolic acid MSDS**. [Online]. Available : [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB0296269.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB0296269.htm)

- [33] Wikimedia Commons. 2010. **Mannich reaction**. [Online]. Available : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mannich\\_Reaction\\_V.1.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mannich_Reaction_V.1.png)
- [34] Wikimedia Commons. 2008 **Mannich reaction mechanism**. [Online] Available : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mannichreactionmech3.svg>
- [35] ระวีวรรณ สิทธิโอสถ. 2555. **เคมีอินทรีย์พื้นฐาน Basic Organic Chemistry**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [36] Soderberg, T. 2019. **Imine (Schiff base) formation**. [Online]. Available : [https://chem.libretexts.org/Under\\_Construction/Purgatory/Book%3A\\_Organic\\_Chemistry\\_with\\_a\\_Biological\\_Emphasis\\_\(Soderberg\)/11%3A\\_Nucleophilic\\_carbonyl\\_addition\\_reactions/11.6%3A\\_Imine\\_\(Schiff\\_base\)\\_formation](https://chem.libretexts.org/Under_Construction/Purgatory/Book%3A_Organic_Chemistry_with_a_Biological_Emphasis_(Soderberg)/11%3A_Nucleophilic_carbonyl_addition_reactions/11.6%3A_Imine_(Schiff_base)_formation).
- [37] Ren, J. Xuan, H. and Ge, L. 2019 “Double network self-healing chitosan/dialdehyde starch-polyvinyl alcohol film for gas separation.” *Applied Surface Science* 469 : 213-219.
- [38] Dwi, R. and Cuk, I. 2018 “Time Temperature Indicator Label using Black Corn Extract and Chitosan Matrix.” **IOP Conference Series: Journal of Physics** 1120.
- [39] Liang, T. and Wang, L. 2017. “A pH-Sensing Film from Tamarind Seed Polysaccharide with Litmus Lichen Extract as an Indicator.” *Polymers* 10(1) : 13.
- [40] Pacquit, A. Frisby, J. Diamond, D. Lau, K.T. Farrell. A. Quilty, B. and Diamond, D. 2007. “Development of a smart packaging for the monitoring of fish spoilage.” *Food Chemistry* 102 : 466-470.
- [41] Zepon K.M. Martins, M.M. Marques, M.S. Heckler, J.M. Morisso, F.D.P. Moreira, M.G. Ziulkoski, A.L. and Kanis, L.A. 2019. “Smart wound dressing based on k-carrageenan/locust bean gum/cranberry extract for monitoring bacterial infections.” *Carbohydrate Polymers*. 206 : 362-370.
- [42] Xue, Z. Xiaowen, Z. and Lin, Y. 2015. “Synthesis of cationic chitosan hydrogel with long chain alkyl and its controlled glucose-responsive drug delivery behavior.” *RSC Advances*. 5 : 230-241.

- [43] Yang, S., Q. Dong, H. Yang, X. Liu, S. Gu, Y. Zhou, and W. Xu, 2016. "N-carboxyethyl chitosan fibers prepared as potential use in tissue engineering." *International Journal of Biological Macromolecules*. 82 : 1018-1022.
- [44] Zhou, Y., H. Yang, X. Liu, J. Mao, S. Gu, and W. Xu, 2013. "Electrospinning of carboxyethyl chitosan/poly(vinyl alcohol)/silk fibroin nanoparticles for wound dressings." *International Journal of Biological Macromolecules*. 53 : 88-92.
- [45] Chalitangkoon, J. and P. Monvisade. 2021. "Synthesis of chitosan-based polymeric dyes as colorimetric pH-sensing material: potential for food and biomedical application." *Carbohydrate Polymers*. 260 : 117836.
- [46] Ma, Q. Du, L. and Wang, L. 2017. "Tara gum/polyvinyl alcohol-based colorimetric NH<sub>3</sub> indicator films incorporating curcumin for intelligent packaging." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 244 : 759-766.
- [47] Rodríguez, J. Madera-Santana, T. J. Sánchez-Machado, D. Lopez-Cervantes, J. and Valdez, H. 2014. "Chitosan/Hydrophilic Plasticizer-Based Films: Preparation, Physicochemical and Antimicrobial Properties." *Journal of Polymers and the Environment*. 22 : 41-51.
- [48] Mukhopadhyay, A. and Midha, V. K. 2016. **Handbook of Technical Textiles**. New York : CRC Press.
- [49] Peng, Y. and Li, Y. 2014. "Combined effects of two kinds of essential oils on physical, mechanical and structural properties of chitosan films." *Food Hydrocolloids*. 36 : 287-293.
- [50] Yong, H. Wang, X. Zhang, X. Liu, Y. Qin, Y., and Liu, J. 2019. "Effects of anthocyanin-rich purple and black eggplant extracts on the physical, antioxidant and pH-sensitive properties of chitosan film." *Food Hydrocolloids*. 94 : 93-104.
- [51] Wang, H. Zhang, R. Zhang, H. Jiang, S. Liu, H. Sun, M. and Jiang, S. 2015. "Kinetics and functional effectiveness of nisin loaded antimicrobial packaging film based on chitosan/poly(vinyl alcohol)." *Carbohydrate Polymers*. 127 : 64-71.

- [52] Liang, T. and Wang, L. 2017. "A pH-Sensing Film from Tamarind Seed Polysaccharide with Litmus Lichen Extract as an Indicator." *Polymers*. 10(1) : 13.
- [53] Kaolaor, A. Phunpee, S. Ruktanonchai, U.R. and Suwanton, O. 2019. "Effects of  $\beta$ -cyclodextrin complexation of curcumin and quaternization of chitosan on the properties of the blend films for use as wound dressings." *Journal of Polymer Research*. 26(2) : 43.
- [54] ChemicalBook. 2009. **Material Safety Data Sheet *p-Rosolic acid* MSDS.** [Online]. Available : <http://datasheets.scbt.com/sc-215650>.
- [55] Rachmelia, D. and Imawan, C. 2018. "Time Temperature Indicator Label using Black Corn Extract and Chitosan Matrix." *Journal of Physics: Conference Series*. 1120 : 012041.
- [56] Lu, M. Shiau, Y. Wong, J. Lin, R. Kravis, H. Blackmon, T. and Wang, N. S. 2013. "Milk Spoilage: Methods and Practices of Detecting Milk Quality." *Food and Nutrition Sciences*. 04 : 113-123.
- [57] Byrne, L. Lau, K. and Diamond, D. 2002. "Monitoring of headspace total volatile basic nitrogen from selected fish species using reflectance spectroscopic measurements of pH sensitive films." *The Analyst*. 127 : 1338-1341.
- [58] Zhai, X. Shi, J. Zou, X. Wang, S. Jiang, C. Zhang, J. and Holmes, M. 2017. "Novel colorimetric films based on starch/polyvinyl alcohol incorporated with roselle anthocyanins for fish freshness monitoring." *Food Hydrocolloids*. 69 : 308-317.
- [59] Pacquit, A. Frisby, J. Diamond, D. Lau, K. Farrell, A. Quilty, B. and Diamond, D. 2007. "Development of a smart packaging for the monitoring of fish spoilage." *Food Chemistry*. 102 : 466-470.
- [60] Prietto, L. Mirapalhete, T. C. Pinto, V. Z. Hoffmann, J. F. Vanier, N. L. Lim, L.-T. and da Rosa Zavareze, E. 2017. "pH-sensitive films containing anthocyanins extracted from black bean seed coat and red cabbage." *LWT*. 80 : 492-500.
- [61] Manju, S. Muraleedharan, C. V. Rajeev, A. Jayakrishnan, A. and Joseph, R. 2011. "Evaluation of alginate dialdehyde cross-linked gelatin hydrogel as a biodegradable sealant for polyester vascular graft." *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 98B(1) : 139-149.

ต้นฉบับไม่มีหน้าภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวเจนจิรา บัวแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	18 เมษายน พ.ศ. 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	199/47 ม 9 ต. กระทุ่มล้ม อ. สามพราน นครปฐม 73220
ประวัติการศึกษา	ปี 2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.43 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. จันทร์จิรา ฮวยตระกูล จิรภาส เสวตสกุลานนท์ และเจนจิรา บัวแก้ว, 2560. “การสังเคราะห์ การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติของ อนุพันธ์ <i>N</i> -Methoxybenzyl chitosan จากปฏิกิริยาชิฟเบส” โครงการ พิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2. Buakaew, J. Chalitangkoon, J and Monvisade, P. 2021 “pH- responsive films from chitosan-based/poly(vinyl alcohol)/oxidized alginate for intelligent packaging” The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-11), During July 1 <sup>st</sup> -2 <sup>nd</sup> , 2021 Online conference.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้