

การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต

ร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE FILM USING POLYHYDROXY BUTYRATE  
IN COMBINATION WITH GLYCEROL AND LIGNOSULFONATE



พฤกษ์สุตา สกกุลแก้ว  
PRUEKSUDA SAKOOLKAEW

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2024-EN--M-117-272

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE FILM USING POLYHYDROXY BUTYRATE  
IN COMBINATION WITH GLYCEROL AND LIGNOSULFONATE



PRUEKSUDA SAKOOLKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD AND AGRICULTURAL INTELLIGENCE ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2024  
KMITL-2024-EN-M-117-272

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต
นักศึกษา	นางสาวพฤกษ์สุดา สกุณแก้ว
รหัสประจำตัว	63601292
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอล และลิกโนซัลโฟเนต โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์ม และการเพิ่มคุณสมบัติของฟิล์มโดยมีความเข้มข้นกลีเซอรอล (50.0, 44.1, 30.0, 15.9 และ 10.0 % โดยน้ำหนักของ PHB) และลิกโนซัลโฟเนต (12.0, 10.2, 6.0, 1.8 และ 0.0 % โดยน้ำหนักของ PHB) เพื่อศึกษาความหนา ความต้านทานแรงดึง การซึมผ่านไอน้ำ การดูดซึมน้ำ การต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่ากลีเซอรอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS เพิ่มขึ้น แต่ความทนต่อแรงดึงลดลง ลิกโนซัลโฟเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลปริมาณการซึมผ่านไอน้ำ และการดูดความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตสภาวะที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นกลีเซอรอล 39.1 % โดยน้ำหนักของ PHB และลิกโนซัลโฟเนต 12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB สังเกตได้จากการยับยั้งเชื้อ และการต้านอนุมูลอิสระ ทั้ง 2 อย่าง เป็นสาเหตุหลักในการทำให้คุณภาพของอาหารเสื่อมลง ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า ลิกโนซัลโฟเนตมีประสิทธิภาพที่จะใช้เป็นวัสดุในการต้านอนุมูลอิสระ เพื่อป้องกันไม่ให้อาหารเสื่อมเสียได้เร็วและยืดอายุการเก็บรักษาอาหารในบรรจุภัณฑ์ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ลิกนินอีกด้วย

Thesis	Development of biodegradable film using polyhydroxy butyrate in combination with glycerol and liginosulfonate
Student	Ms. Prueksuda Sakoolkaew
Student ID.	63601292
Degree	Master of Engineering
Program	Food and Agricultural Intelligence Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Teerin Chysirichote

## ABSTRACT

This research aims to develop the biodegradable films using polyhydroxy butyrate (PHB) combined with glycerol and liginosulfonate by studying the optimal conditions for film production and the enhancement of film properties by varying the concentrations of glycerol (50.0, 44.1, 30.0, 15.9, and 10.0 % of PHB weight) and liginosulfonate (12.0, 10.2, 6.0, 1.8, and 0.0 % of PHB weight) to study the thickness, tensile strength, water vapor permeability, moisture uptake, antibacterial resistance, total phenolic content and antioxidant properties. The results show that increasing the concentration of glycerol results in an increase in film thickness and antioxidant activity by ABTS method but reduces tensile strength. On the other hand, increasing the concentration of liginosulfonate has a significant positive impact on enhances antibacterial activity against *Staphylococcus aureus*, increasing total phenolic content and improving antioxidant properties but reducing water vapor permeability and moisture uptake. The optimization was founded on the PHB film with glycerol and liginosulfonate 39.1 and 12.0 % of PHB weight, respectively. The findings suggest that liginosulfonate shows potential as a material to enhance antioxidant properties, prevent food spoilage and extend the shelf life of packaged food. Additionally, the study presented an alternative way to use lignin as a valuable resource.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน และหลายหน่วยงานที่ช่วยชี้แนะ และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าท่านได้ให้คำแนะนำและความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างมากในระหว่างการศึกษาและการวิจัยของข้าพเจ้า ความมุ่งมั่นของท่านต่อการส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ สนับสนุน และปรับปรุงงานวิทยานิพนธ์ของเราให้ดียิ่งขึ้น ความใส่ใจและการช่วยเหลือของท่านในทุกขั้นตอนของการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณอำนาจ คุณตะคุ คุณบุญนำ ผลโพธิ์ และคุณวรภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ ซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและธุรการภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่มีส่วนร่วมอย่างมากในการสนับสนุนช่วยในขณะดำเนินงานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า เอื้อเฟื้อสถานที่ อำนวยความสะดวกในการยืมอุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณทุกท่านที่ได้ร่วมทำให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นจริง การสนับสนุนและความอดทนของทุกท่านได้เป็นกำลังใจอันมีค่า และได้ช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถสร้างผลงานที่มีคุณค่าและเป็นประโยชน์ต่อสังคมและวิชาการ

พลกษัสุดา สกุลแก้ว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ลิกนิน.....	5
2.1.1 ประเภทของลิกนิน.....	8
2.2 ลิกโนซัลโฟเนต.....	9
2.3 พอลิเมอร์ชีวภาพ.....	13
2.3.1 พอลิเมอร์ชีวภาพจากสตาร์ช.....	13
2.3.2 พอลิเมอร์ชีวภาพจากโปรตีน.....	13
2.3.3 Polylactic Acid.....	14
2.3.4 Polyhydroxyalkanoates.....	14
2.4 พลาสติกไซเซอร์.....	16
บทที่ 3 วัสดุและวิธีการทดลอง.....	18
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมลิกโนซัลโฟเนต.....	18
3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปฟิล์ม.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	19
3.1.3.1 การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์ม.....	19
3.1.3.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์ม.....	19
3.1.3.3 การวิเคราะห์การซึมผ่านของไอน้ำ.....	19
3.1.3.4 การวิเคราะห์การดูดความชื้น.....	19
3.1.3.5 การวิเคราะห์สมบัติการต้านจุลินทรีย์.....	19
3.1.3.6 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม.....	20
3.2 วิธีการทดลอง.....	21
3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	21
3.2.2 การเตรียมลิกโนซัลโฟเนต.....	22
3.2.3 การขึ้นรูปฟิล์ม.....	22
3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม.....	23
3.2.4.1 การวิเคราะห์ความหนา.....	23
3.2.4.2 การวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง.....	23
3.2.4.3 การวิเคราะห์การซึมผ่านไอน้ำ.....	23
3.2.4.4 การวิเคราะห์ดูดความชื้น.....	24
3.2.5 การวิเคราะห์การต้านจุลินทรีย์ของฟิล์ม.....	24
3.2.6 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์ม.....	25
3.2.7 การวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม.....	25
3.2.7.1 การวัดด้วยวิธี DPPH.....	25
3.2.7.2 การวัดด้วยวิธี ABTS.....	26
3.2.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มด้วยวิธี FTIR.....	26
3.2.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	27
4.1 ผลของการเติมกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตแตกต่างกันต่อคุณสมบัติของฟิล์ม.....	27
4.1.1 ความหนา.....	27
4.1.2 ความทนทานต่อแรงดึง.....	30
4.1.3 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และค่าการดูดความชื้น.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของการลิกโนซัลโฟเนตต่อการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต.....	40
4.3 ผลของการเติมกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต.....	41
4.4 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเทคนิค FTIR.....	51
4.5 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตด้วยการ เติมกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	67

# สารบัญตาราง

	หน้า
3.1 รหัสและระดับของตัวแปรอิสระตามแผนการทดลอง Central composite design.....	21
3.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central composite designและรหัสของฟิล์ม.....	22
4.1 อิทธิพลของกลีเซอรอลและลิควิดโฟเนตต่อคุณสมบัติของฟิล์ม.....	28
4.2 ค่าการทดสอบพื้นที่การยับยั้งเชื้อมีความเข้มข้นลิควิดโฟเนตแตกต่างกัน.....	41
4.3 อิทธิพลของกลีเซอรอลและลิควิดโฟเนตต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ.....	51
4.4 การเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรีตร่วมกับกลีเซอรอลและลิควิดโฟเนต.....	54



# สารบัญรูปภาพ

	หน้า
2.1 ภายในผนังเซลล์พืช.....	5
2.2 ส่วนประกอบในโครงสร้างลิกนิน.....	6
2.3 การเชื่อมโยง phenylpropane ในโครงสร้างลิกนิน.....	7
2.4 โครงสร้างของลิกโนซัลโฟเนตซึ่งแสดงพันธะที่เป็นไปได้และรูปแบบการแทนที่ในโมเลกุล.....	10
2.5 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำเยื่อซัลไฟต์ที่เป็นกรดเพื่อผลิตลิกโนซัลโฟเนต.....	11
2.6 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำเยื่อซัลไฟต์ที่เป็นกลางเพื่อผลิตลิกโนซัลโฟเนต.....	12
2.7 โครงสร้างของ polyhydroxy butyrate.....	15
3.1 inhibition zone.....	25
4.1 ความหนาของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6.....	27
4.2 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต.....	29
4.3 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม.....	29
4.4 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของความหนาของฟิล์ม.....	30
4.5 ความทนต่อแรงดึงของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 .....	31
4.6 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต.....	32
4.7 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อความทนทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม.....	32
4.8 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของความทนทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม.....	33
4.9 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และG10S6.....	34
4.10 การวัดความชื้นของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6.....	32
4.11 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) การซึมผ่านไอน้ำ และ (ข) การวัดความชื้นของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต.....	37

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.12 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อ (ก) ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และ (ข) การดูดความชื้นของแผ่นฟิล์ม.....	38
4.13 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของ (ก) ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และ (ข) การดูดความชื้นของแผ่นฟิล์ม.....	39
4.14 การต่อต้านจุลินทรีย์ของความเข้มข้นลิกโนซัลโฟเนตแตกต่างกัน (ก) <i>Staphylococcus aureus</i> และ (ข) <i>Aspergillus niger</i> .....	41
4.15 ค่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 ด้วยวิธี Folin Ciocalteu reagent.....	42
4.16 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต.....	43
4.17 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแผ่นฟิล์ม.....	43
4.18 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแผ่นฟิล์ม.....	44
4.19 ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 ด้วยวิธี DPPH.....	47
4.20 ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 ด้วยวิธี ABTS.....	47
4.21 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต (ก) วิธี DPPH และ (ข) วิธี ABTS.....	48
4.22 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี (ก) DPPH และ (ข) ABTS ของแผ่นฟิล์ม.....	49
4.23 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี (ก) DPPH และ (ข) ABTS ของแผ่นฟิล์ม.....	50
4.24 FTIR spectra ของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต.....	52
ก.1 การวัดความหนา.....	63
ก.2 การเตรียมตัวอย่างฟิล์มสำหรับการวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง.....	63
ก.3 กราฟมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ Trolox ด้วยวิธี Folin Ciocalteu.....	64

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

	หน้า
ก.4 กราฟมาตรฐานฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของ Trolox.....	65
ก.5 กราฟมาตรฐานฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ATBS ของ Trolox.....	66



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันส่วนใหญ่พลาสติกที่มนุษย์นำมาใช้ในชีวิตประจำวันเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อมลภาวะต่างๆ และสภาวะโลกร้อน จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพทดแทนการใช้พลาสติกจากปิโตรเคมี (Garcia-Garcia *et al.*, 2022) เช่น polyhydroxy butyrate (PHB), polylactic acids (PLAs) (Vroman and Tinghzert, 2009) และ thermoplastic starch (Zhang *et al.*, 2014) ที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าความต้องการของพอลิเมอร์ชีวภาพทั่วโลกจะเพิ่มมูลค่าขึ้นจาก 11.5 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2022 เป็น 27.3 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2027 (Market and Market, 2023) ซึ่งความต้องการเหล่านี้เป็นตัวกระตุ้นให้อุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นบรรจุภัณฑ์ การเกษตร สีน้าอูโปโกคบริโกลค ยานยนต์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ (Solihat *et al.*, 2021) โดยพอลิไฮดรอกซีบิวเทรตซึ่งได้รับความสนใจมากในวงการพลาสติก โดยเฉพาะเนื่องจากความคล้ายคลึงในลักษณะทางกายภาพและเคมีกับพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีน เช่นความทนทาน ความยืดหยุ่น และความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ทำให้ PHB เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน และมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี อย่างเช่น ลิกนิน เซลลูโลส และไคโตซาน มาใช้ทดแทนเนื่องจากวัสดุเหล่านี้เป็นทางเลือกที่หลากหลายในการผลิตฟิล์มให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Wang *et al.*, 2021) ซึ่งลิกนินเป็นวัสดุชีวมวลที่มีการนำมาใช้ปริมาณมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลส โดยแหล่งที่ผลิตลิกนินใหญ่ที่สุดคืออุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อเซลลูโลส แต่มีการนำลิกนินมาใช้เพียง 5 % ทั่วโลกสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม (Li *et al.*, 2019) การพัฒนาลิกนินได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ลิกนินประกอบด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ phenylpropanoid monomer เช่น p-hydroxyphenyl guaiacyl และ syringyl โดยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดทางพันธุกรรมและกระบวนการสกัด หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างลิกนินที่แตกต่างกันทำให้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ การดูดซึ่มรังสียูวี และความต้านทานต่อจุลินทรีย์ (Ikeda *et al.*, 2017) ซึ่งลิกนินมีการแตกตัวสูง และไม่ละลายน้ำที่มีค่า pH เป็นกลาง ส่งผลให้มีการนำแอลคาไลลิกนินนำไปใช้ในอุตสาหกรรมน้อยมาก ดังนั้นเพื่อใช้แอลคาไลลิกนินให้มี

ประสิทธิภาพจำเป็นต้องปรับปรุงน้ำหนักโมเลกุลและความสามารถในการละลายน้ำโดยการดัดแปลงทางเคมี เช่น ซัลโฟเนชัน ออกซิเดชัน และโคพอลิเมอไรเซชัน ลิกนินที่ผ่านการดัดแปลงแล้วสามารถใช้เป็นสารช่วยกระจาย (dispersant) และพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) วิธีซัลโฟเนชันเป็นการดัดแปลงลิกนินที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยกลุ่ม sulfonic เป็นส่วนที่ช่วยให้แอลคาไลลิกนินละลายน้ำได้ดีขึ้น หรือที่เรียกว่า ลิกโนซัลโฟเนต โดยกระบวนการการซัลโฟเนตนำเข้าของกลุ่มกรดซัลฟอนิกลงบนโครงสร้างของลิกนิน ซึ่งทำให้เกิดพอลิเมอร์ที่ละลายในน้ำซึ่งสามารถนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่นเป็นตัวกระจาย สารที่ใช้ในการยัดเหนียว การเติบโตผลึก สารช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับ emulsion และเป็นสารคีเลตอีกด้วย (Zhou et al., 2015) นอกจากนี้ลิกโนซัลโฟเนตสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษ และยังมี carbon footprint น้อยอีกด้วย

งานวิจัยนี้สนใจในการเพิ่มคุณสมบัติของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (PHB) เพื่อสามารถใช้ในการป้องกันการเสื่อมเสียของอาหาร ยืดอายุการเก็บรักษา สำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารได้ งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต จึงต้องศึกษาผลต่อการลิกโนซัลโฟเนตและกลีเซอรอลในการผลิตฟิล์มจาก PHB ต่อคุณสมบัติของฟิล์ม การซึมผ่านไอน้ำ การดูดความชื้น การต้านแบคทีเรีย สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และองค์ประกอบของฟิล์ม

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโดยใช้ลิกโนซัลโฟเนตและกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยศึกษาผลของการเติมกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อคุณสมบัติของฟิล์ม การซึมผ่านไอน้ำ การดูดความชื้น การต้านจุลินทรีย์ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ตัวแปรต้น คือ ความเข้มข้นของกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต

1.3.2 ตัวแปรตาม คือ ความหนา ความต้านทานแรงดึง การซึมผ่านไอน้ำ การดูดความชื้น การต้านจุลินทรีย์ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดหาวัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง
- 1.4.3 ทดลองการผลิตฟิล์มโดยใช้ลิโคโนซิลโฟเนตและกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน
- 1.4.4 วิเคราะห์ตัวอย่างจากการทดลองการผลิตฟิล์ม
  - 1.4.4.1 ความหนา
  - 1.4.4.2 ความต้านทานแรงดึง
  - 1.4.4.3 การซึมผ่านไอน้ำ
  - 1.4.4.4 การต้านจุลินทรีย์
  - 1.4.4.5 การต้านอนุมูลอิสระ
  - 1.4.4.6 โครงสร้างฟิล์ม
  - 1.4.4.7 องค์ประกอบฟิล์ม
- 1.4.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.4.6 เขียนรายงานและจัดทำรูปเล่ม

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบกระบวนการผลิตฟิล์มและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต โดยใช้ลิโคโนซิลโฟเนตและกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ลินินซึ่งเป็นวัสดุชีว-มวลที่มีมากให้เกิดประโยชน์ในการนำมาผลิตฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- 1.5.2 ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอล และลิโคโนซิลโฟเนต ต่อคุณสมบัติของฟิล์ม การซึมผ่านไอน้ำ การดูดความชื้น การต้านจุลินทรีย์ สารประกอบพินอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

## 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 จะประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 แสดงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ลิกนิน ลิกโนซัลโฟเนต พอลิเมอร์ชีวภาพ พลาสติไซเซอร์

บทที่ 3 อธิบายวัสดุอุปกรณ์ วิธีการเตรียมลิกโนซัลโฟเนต การขึ้นรูปฟิล์ม และการวิเคราะห์ ตัวอย่างจากการผลิตฟิล์ม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลและวิจารณ์การทดลองการผลิตฟิล์มจากพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโดยใช้ลิกโนซัลโฟเนตและกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ



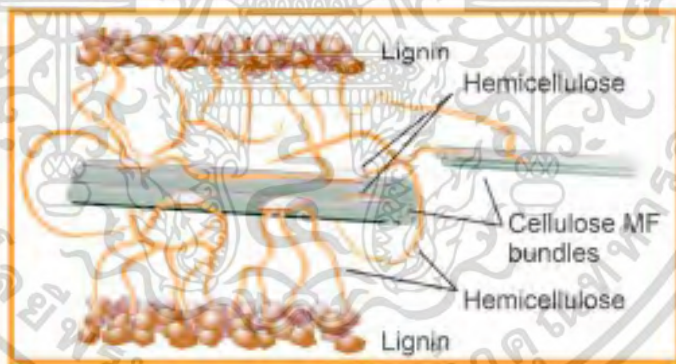
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลิกนิน

ลิกนินมาจากภาษาละตินคำว่า lignum ซึ่งหมายถึงไม้หรือที่เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทใยอาหารที่ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโซ่โมเลกุลของ oxygenated phenyl propane มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000-4,500 ดาลตัน ซึ่งลิกนินเป็นส่วนประกอบหลักของผนังในเซลล์พืชเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติสามารถพบได้ทั่วไปจึงคาดว่ามีการผลิตประมาณ 2 หมื่นล้านตันต่อปี โดยลิกนินจะแตกต่างจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเนื่องจากประกอบด้วย polymer phenyl-propane ขนาดยาวเชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ ซึ่งหน้าที่หลักของลิกนินคือเป็นกาวในการตั้งเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เพื่อปิดช่องว่างแต่ละช่องในผนังเซลล์ของพืช (รูปที่ 2.1) ดังนั้นลิกนินจึงทำให้การย่อยสลายได้ยาก ความเข้มข้นของลิกนินขึ้นอยู่กับขนาด การเจริญเติบโต ธรรมชาติ และคุณสมบัติของชีวมวลของพืช

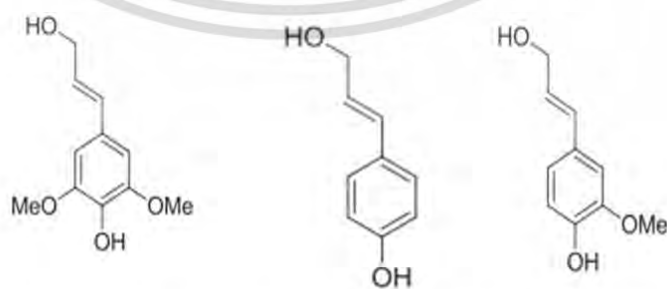


รูปที่ 2.1 ภายในผนังเซลล์พืช (Balk et al., 2023)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากเป็นอันดับสองของโลกรองจากเซลลูโลสคิดเป็น 18-35 % โดยน้ำหนักของไม้ โดยแหล่งการผลิตลิกนินขนาดใหญ่ที่สุดคืออุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อเซลลูโลส เนื่องจากโลกกำลังเผชิญกับปัญหาขยะพลาสติกสังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ลิกนินจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับการผลิตคอมโพสิตพอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นวัสดุพอลิเมอร์ราคาไม่แพงที่มีอยู่อย่างมากมาย ยั่งยืน และราคาไม่แพง ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิต ลิกนินพอลิ-

เมอร์เป็นผลพลอยได้จากผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มมูลค่าของ ลิกนินในวัสดุคอมโพสิตสำหรับการใช้งานที่มีมูลค่าสูงอาจส่งผลให้ได้รับผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมาก มันถูกนำไปใช้ในภาคส่วนต่างๆ เป็นส่วนประกอบหลักหรือสารเติมแต่งสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ พลาสติกชีวภาพที่เป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน แต่ในปัจจุบันมีการนำลิกนินมาใช้ เพียง 5 % ทั่วโลกสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม (Li et al., 2019) ส่วนที่เหลือนั้นนำไปเป็น เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระดาษและเซลลูโลส

คุณลักษณะที่กำหนดของไม้และเนื้อเยื่อ lignified พบได้ในระดับโมเลกุล โดยความแข็งของไม้ ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตและโครงสร้างของโครงข่ายสามมิติที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งประกอบด้วยสอง ประเภทของส่วนประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่สองประเภทที่แยกออกจากกันได้แก่ พอลิแซคคาไรด์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน และสารอะโรมาติกบางส่วนที่ไม่ชัดเจนเรียกว่าลิกนิน โดยพอลิแซคคาไรด์คิดเป็น 65-75 % ของน้ำหนักของไม้ ลิกนินคิดเป็น 18-35 % โดยใช้อัตราส่วนเหล่านี้ในการแบ่ง ต้นไม้เป็นไม้เนื้ออ่อนซึ่งมีปริมาณเซลลูโลส 40-45 % โดยน้ำหนัก ลิกนิน 26-34 % โดยน้ำหนัก และไม้เนื้อแข็งมีปริมาณเซลลูโลสใกล้เคียงกัน 38-49 % โดยน้ำหนัก แต่โดยทั่วไปจะมีลิกนินต่ำกว่า 23-30 % โดยน้ำหนัก (Balk et al., 2023) โดยลิกนินสามารถละลายได้ในตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ ไดออกเซน ไพริดีน ไดมethylซัลฟอกไซด์ อะซิโตน และในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นสูงที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถละลายได้ง่ายในสารละลายอัลคาไลน์ที่อุณหภูมิต่ำและสูง ในโครงสร้างลิกนินมีส่วนประกอบอะโรมาติกฟีนอล 3 ชนิดคือ coniferyl (G), p-coumaryl (H) และ sinapyl (S) เป็นมอนอเมอร์หลัก (รูปที่ 2.2) (Tawaf et al., 2022) โดยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดทางพันธุกรรมและกระบวนการสกัด หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างลิกนินที่แตกต่างกันทำให้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ การดูดซึ่มรังสียูวี และความต้านทานต่อจุลินทรีย์ (Ikeda et al., 2017)

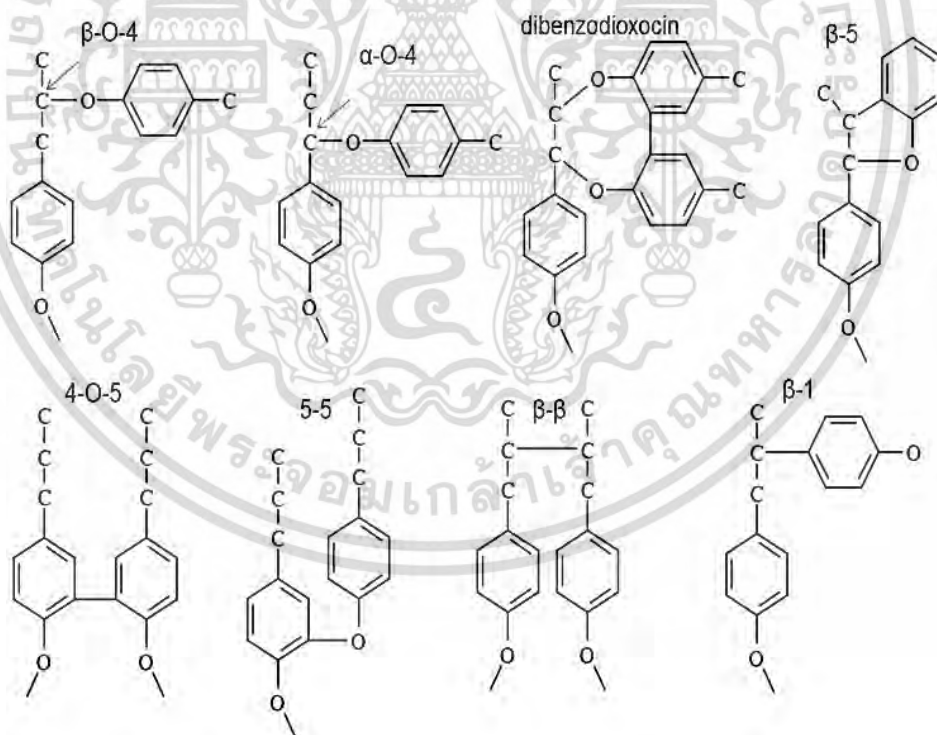


Syringyl alcohol/sinapyl (S) Coumaryl alcohol/ Hydroxyphenyl (H) Coniferyl/ guaiacyl (G)

รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบในโครงสร้างลิกนิน (Tawaf et al., 2022)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิกนินมีหมู่ฟีนอลิกไฮดรอกซิล เมทอกซิล และหมู่เทอร์มินัลอัลดีไฮด์ โดยในไม้เนื้ออ่อนมีลิกนินที่ประกอบด้วยหน่วย guaiacyl ส่วนลิกนินในไม้เนื้อแข็งมี guaiacyl-syringyl ในขณะที่พืชตระกูลหญ้า หน่วย p-coumaryl alcohol ในการสังเคราะห์ลิกนินระหว่างกระบวนการดึงเอาไฮโดรเจนอะตอมออกจากโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์และมีเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสช่วยเร่งปฏิกิริยากลุ่ม alcoholic hydroxyl และ carbonyl จะถูกหลอมรวมเข้ากับโครงสร้างของลิกนิน โครงสร้างลิกนินมีกลุ่มฟังก์ชันการทำงานร่วมกันและมีการเชื่อมต่อกันระหว่างส่วนประกอบอะโรมาติกฟีนอล มีเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่มีการเชื่อมโยง  $\beta$ -O-4,  $\alpha$ -O-4, dibenzodioxocin,  $\beta$ -5, 5-5, 4-O-5,  $\beta$ - $\beta$  และ  $\beta$ -1 โดยความหนาแน่นของโครงสร้างลิกนินมาจากอัตราส่วนมอนอเมอร์ รูปแบบองค์ประกอบ และการเชื่อมโยงจำนวนหนึ่งระหว่างมอนอเมอร์ลิกนิน โดยทั่วไปมีพันธะบางส่วนจัดเรียงอยู่ในพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ( $\beta$ -1,  $\beta$ - $\beta$ , 5-5) พันธะคาร์บอน-ออกซิเจน ( $\alpha$ -O-4,  $\beta$ -O-4, และ 4-O-5), พันธะคาร์บอน-ออกซิเจนและคาร์บอน-คาร์บอน ( $\beta$ -5/  $\alpha$ -O-4,  $\beta$ - $\beta$  /  $\alpha$ -O- $\gamma$ ) โดยการเชื่อมโยงอีเธอร์  $\beta$ -O-4 ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์คิดเป็น 60 % ของทั้งหมด (Tawaf et al., 2022)



รูปที่ 2.3 การเชื่อมโยง phenylpropane ในโครงสร้างลิกนิน (Tawaf et al., 2022)

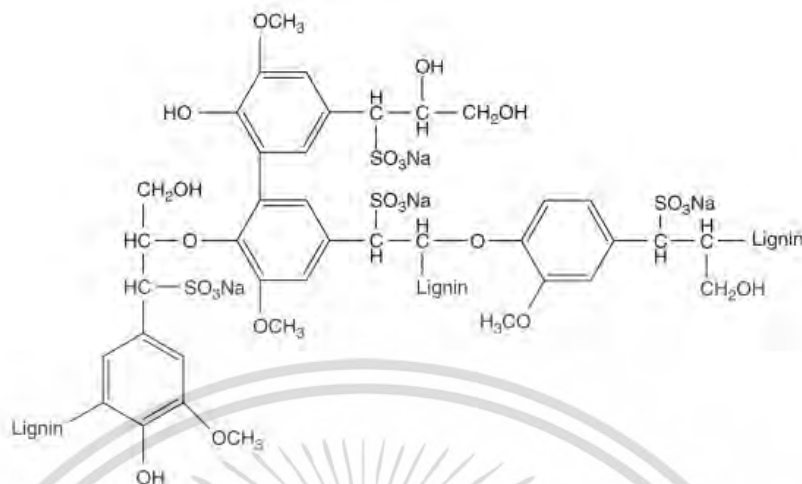
### 2.1.1 ประเภทของลิกนิน

ตามกระบวนการแยกและการผลิตเยื่อกระดาษ สามารถแบ่งลิกนินออกเป็น 5 แบบด้วยกัน คือ 1. Technical lignin ได้มาจากกระบวนการผลิตกระดาษ เยื่อกระดาษ และเซลลูโลสในระดับอุตสาหกรรม 2. Kraft lignin ได้มาจากหลังกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยลิกนินจะมีกลุ่มซัลเฟต 3. Lignosulfonate ได้มาจากระหว่างกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยลิกนินจะมีกลุ่มซัลไฟต์ 4. Alkali lignin ได้มาจากการลิกนินออกจากชีวมวลด้วยการใช้ alkali ที่แตกต่างกัน 5. Organosolv lignin ได้มาจากการใช้สารละลายอินทรีย์ในการแยกออกมาจากวัสดุที่มีชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส และลิกนินอื่นๆ โดยประสิทธิภาพการแยกลิกนินขึ้นอยู่กับผลผลิต ความบริสุทธิ์ และระดับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างลิกนิน ซึ่งการแยกลิกนินจำเป็นต้องทำลายพันธะโควาเลนต์ อีเทอร์ และไฮโดรเจนระหว่างลิกนินและส่วนอื่น ๆ ออกจากกันในกระบวนการแยกพันธะของลิกนินอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น พันธะอีเทอร์ คาร์บอน-คาร์บอน ออกซิเจน-คาร์บอน และอื่นๆ แทนที่จะย่อยสลายเป็นส่วนเล็ก ๆ มีการทดสอบวิธีการปรับสภาพที่แตกต่างกัน โดยการปรับสภาพมีความจำเป็นสำหรับการแยกลิกนิน เนื่องจากลิกนินเป็นหนึ่งในโครงสร้างที่แข็งที่สุดในการแยกส่วนประกอบหลักของชีวมวลจากพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ วิธีการทางกายภาพทางชีวภาพและทางเคมี เพื่อย่อยสลายและไฮโดรไลซ์ชีวมวลของพืชให้เป็นมอนอเมอร์ โดยวิธีการปรับสภาพมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีการปรับสภาพทางกลเป็นการเปลี่ยนจากชิ้นส่วนของชีวมวลให้อยู่ในรูปร่างของอนุภาคเล็กลง กำจัดน้ำ ลดการใช้พลังงานสูงในการทำปฏิกิริยาเพื่อขั้นตอนปรับสภาพต่อไป เช่น ฮอโมจีไนซ์เซอร์ด้วยแรงดันสูง การบดด้วยลูกสูบ และอัลตราโซนิก วิธีการปรับสภาพด้วยความร้อนเป็นการใช้อุณหภูมิสูงในการย่อยสลายชีวมวลของพืชให้เป็นพอลิแซคคาไรด์และคาร์บอนโดยตรง โดยช่วงอุณหภูมิที่ 120-180 องศาเซลเซียส ใช้ในการสลายโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลอื่นๆ ในขณะที่การใช้ความร้อนสูงเป็นการขจัดสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอน้ำได้ง่าย คาร์บอน และก๊าซออกจากชีวมวล (Ruiz et al., 2008) วิธีการปรับสภาพด้วยกระบวนการลิกโนซัลโฟเนต เป็นการแยกลิกนินด้วยการใช้ซัลไฟต์และไบซัลไฟต์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำโดยมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้ของซัลเฟอร์และผลิตภัณฑ์ซัลไฟต์สำหรับทำของเหลวในเยื่อกระดาษ โดยปฏิกิริยานี้ใช้อัลคาไลน์หรือคาร์บอเนตเพื่อปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 1-6 และอุณหภูมิ 140-160 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือ พอลิเมอร์ของลิกโนซัลโฟเนตสามารถละลายน้ำได้ วิธีการปรับสภาพด้วยกระบวนการคราฟต์เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระดาษและเซลลูโลสเพื่อเอาลิกนินออกจากไม้ ในกระบวนการนี้มีการใช้โซเดียมซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เพื่อแยกลิกนินออกจากเซลลูโลส การเติมสารละลายแอลคาไลที่อุณหภูมิสูงประมาณ 150-170

องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 100–120 นาที ทำให้เกิดของเหลวสีน้ำตาลและเซลลูโลส ลิกนินจะตกตะกอนด้วยกรดจากของเหลวของเหลวสีน้ำตาล วิธีการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นการใช้สารเคมีร่วมกับการให้ความร้อนในการแยกชีวมวลออกเป็นลิกนินเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยใช้กรดความเข้มข้นต่ำทำลายพื้นผิวด้านนอกในการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกมา ในขณะที่กรดความเข้มข้นสูงที่อุณหภูมิสูงจะแยกโครงสร้างของชีวมวลออก โดยส่วนใหญ่จะใช้กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก (Lenihan et al., 2010) นอกจากนี้มีการใช้สารละลายอัลคาไลน์ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเชื่อมพันธะของลิกนินเข้าด้วยกัน ทำลายเซลลูโลสของชีวมวลได้น้อยมาก และเมื่อให้ความร้อนเพิ่มสามารถย่อยเอนไซม์เป็นน้ำตาลได้อีกด้วย (Yan et al., 2015) วิธี Organosolv เป็นกระบวนการปรับสภาพชีวมวลเพื่อแยกลิกนินออก โดยใช้สารละลายอินทรีย์ที่ละลายในน้ำภายใต้เงื่อนไขความดันและอุณหภูมิสูง เพื่อสกัดให้ได้ลิกนินบริสุทธิ์ปราศจากซัลเฟอร์ การปรับสภาพด้วยวิธี organosolv เป็นการตัดพันธะระหว่างคาร์โบไฮเดรตกับลิกนินให้แยกจากกัน โดยลิกนินที่ได้จากวิธีนี้มีคุณสมบัติสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ที่ดี เช่น polymers polyesters polyurethanes และ phenol formaldehyde resins วิธีการปรับสภาพทางชีวภาพ เป็นการเตรียมชีวมวลโดยใช้แบคทีเรีย เชื้อรา หรือ ยีสต์ นอกจากนี้ในการปรับสภาพด้วยวิธีชีวภาพมีการใช้เอนไซม์เฉพาะต่าง ๆ ในรูปแบบของเอนไซม์เดี่ยวหรือสารละลายเอนไซม์ผสมเข้าไปในกระบวนการเช่นกัน โดยหน้าที่ของจุลินทรีย์และเอนไซม์คือการแยกชีวมวลออกเป็นโมเลกุลพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งความสำคัญของวิธีทางชีวภาพคือการใช้พลังงานต่ำ ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีสารเคมีที่เป็นพิษ

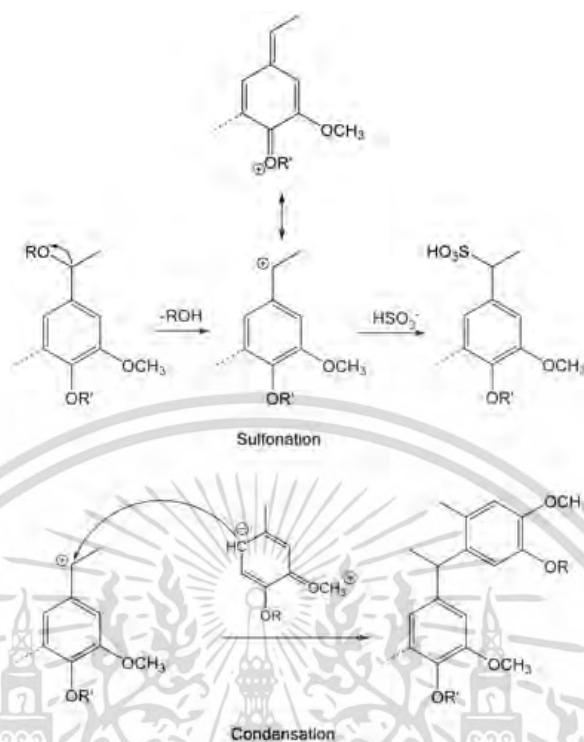
## 2.2 ลิกโนซัลโฟเนต

ลิกโนซัลโฟเนต หรือ ลิกนินซัลโฟเนต และซัลไฟต์ลิกนินนั้นเป็น macromolecules ที่มีการแตกแขนงสูงและเกิดจากหน่วย phenylpropane เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ หรือ พันธะ C-C ซึ่งอยู่ระหว่างแหวนอะโรมาติก โดยมีน้ำหนักโมเลกุลของลิกโนซัลโฟเนตอยู่ในช่วง  $10^3$ - $10^6$  กรัม/โมล รูปที่ 2.4 เป็นภาพของโครงสร้างของลิกโนซัลโฟเนตซึ่งแสดงพันธะที่เป็นไปได้และรูปแบบการแทนที่ในโมเลกุล ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของลิกโนซัลโฟเนต (ไม้เนื้ออ่อนหรือเนื้อแข็ง) กระบวนการผลิตเยื่อและการแยกที่แตกต่างกันในเชิงลักษณะโครงสร้าง เช่น จำนวนของกลุ่มฟังก์ชัน ลำดับการซัลโฟเนต น้ำหนักโมเลกุล และไอออนดุลประจุ (Flatt and Schober, 2012)



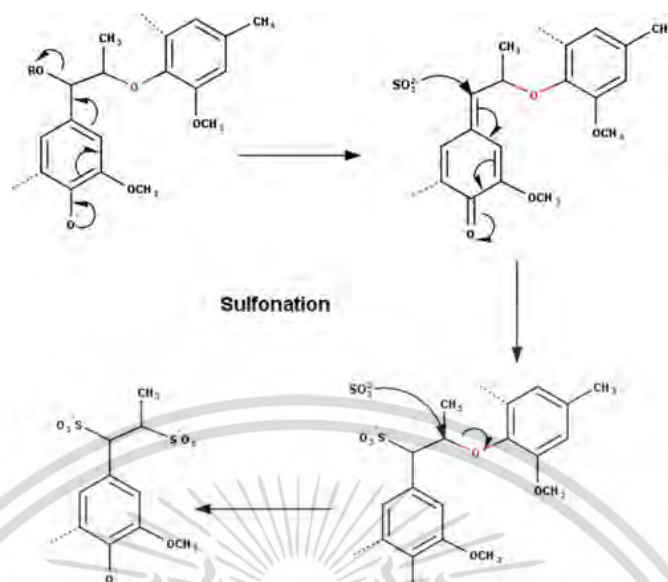
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกโนซัลโฟเนตซึ่งแสดงพันธะที่เป็นไปได้และรูปแบบการแทนที่ในโมเลกุล

ลิกโนซัลโฟเนตเป็นสารที่ได้มาจากระบวนการทำเยื่อไม้ซัลไฟต์ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิตเยื่อซัลไฟต์มีค่า pH 1-5 และกระบวนการผลิตเยื่อซัลไฟต์กึ่งเคมีมีค่า pH 5-7 โดยเบสที่ใช้กันมากที่สุดคือโซเดียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม และแอมโมเนียม ในกระบวนการผลิตเยื่อซัลไฟต์มีปฏิกิริยาหลักสองประการที่เกิดขึ้นในการละลายลิกนินคือซัลโฟเนชันและการไฮโดรไลซิส จากรูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาทั้งสองนี้ในกระบวนการผลิตเยื่อซัลไฟต์อยู่ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ในระหว่างกระบวนการนี้มีการสูญเสียหมู่ไฮดรอกซิลหรือการแยกออกของของพันธะ  $\alpha$ -อีเทอร์เกิดขึ้นเพื่อสร้าง quinone methide ที่เป็นตัวกลางกับซับสเตรต phenolic หรือ nonphenolic ผ่านทาง benzylic cation (ไฮโดรไลซิส) ซัลไฟต์ไอออนที่มีอยู่ในสารละลายจะเพิ่มโครงสร้างที่ตำแหน่ง  $\alpha$  เพื่อสร้างหน่วยกรดเบนซิลซัลโฟนิค (ซัลโฟเนชัน) ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของลิกโนซัลโฟเนต ปฏิกิริยาการควบแน่นอาจเกิดขึ้นระหว่าง benzylic carbon ของโมเลกุลหนึ่งกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของวงอะโรมาติกของโมเลกุลอื่น (Aro and Fatehi, 2017)



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำเยื่อซัลไฟต์ที่เป็นกรดเพื่อผลิตลิกโนซัลไฟเนต (Aro and Fatehi, 2017)

จากรูปที่ 2.6 เป็นปฏิกิริยาซัลโฟเนชันที่เกิดขึ้นระหว่างการทำเยื่อซัลไฟต์ที่เป็นกลางเพื่อผลิตลิกโนซัลไฟเนต การไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นกับตัวกลางประเภทฟีนอลิกเท่านั้น ในขณะที่การเกิดซัลโฟเนชันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดของอิเล็กตรอนจากการเพิ่มหมู่ซัลโฟนิคแรก กลุ่มกรดซัลโฟนิคนี้ในตำแหน่ง  $\alpha$  ส่งผลให้เกิดการเพิ่มกลุ่มกรดซัลโฟนิคต่อที่ตำแหน่ง  $\beta$  เนื่องจากความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนออก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา depolymerization ของพันธะ  $\beta$ -aryl ether หลังจากกระบวนการผลิตเยื่อซัลไฟต์ลิกโนซัลไฟเนตจะถูกกรองออกมาคิดเป็น 50-80 % โดยน้ำหนักของของแข็งทั้งหมด เฮมิเซลลูโลส 30 % และสารอนินทรีย์ 10 %



รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำเยื่อซัลไฟต์ที่เป็นกลางเพื่อผลิตลิกโนซัลไฟเนต (Aro and Fatehi, 2017)

กระบวนการแยกออกและทำให้ลิกโนซัลไฟเนตบริสุทธิ์มีหลากหลายวิธีออกจากของเหลว กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยวิธีรีโพรดักชันใช้กันอย่างแพร่หลายคือกระบวนการของ Howard เป็นการตกตะกอนของแคลเซียมลิกโนซัลไฟเนตจากของเหลวกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยการเติมปูนขาว ทำให้ได้ลิกนินประมาณ 90-95 % ส่วนวิธีการอื่นๆ ได้แก่ การกรองแบบ ultrafiltration และ ion exclusion ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนในการแยกลิกนินออกจากน้ำตาล สำหรับวิธีการแยกออกและทำให้ลิกโนซัลไฟเนตบริสุทธิ์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ dialysis, electro dialysis, ion exclusion การตกตะกอนในแอลกอฮอล์และการสกัดด้วยเอมีน นอกจากนี้ยังสามารถแยกด้วยการตกตะกอนโดยเกลือแอมโมเนียม (Lebo et al., 2001)

ลิกโนซัลไฟเนตที่ไม่มีการตัดแปงแต่ยังคงมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ซับซ้อน โดยมีการกระจายตัวของโมเลกุลและโครงสร้างที่แตกต่างกันและสามารถละลายได้ในน้ำที่ pH ต่างกันได้ แต่โดยส่วนใหญ่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป โดยลิกโนซัลไฟเนตมีสูตรทางเคมีแยกได้ 2 แบบคือ ไม้เนื้อแข็ง  $C_9H_{8.5}O_{2.5} (OCH_3)_{0.85} (SO_3H)_{0.4}$  และไม้เนื้ออ่อน  $C_9H_{7.5}O_{2.5} (OCH_3)_{1.39} (SO_3H)_{0.6}$  น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีการกระจายตัวและยากที่จะระบุอย่างแม่นยำ จากการวิเคราะห์ด้วย  $^{13}C_{nmr}$  พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันอยู่ในลิกโนซัลไฟเนตได้แก่ กลุ่ม phenolic, hydroxyl 2.0 %, sulfonate 17.5 %, methoxyl 12.5 % และ carboxyl 0.6 % ต่อน้ำหนักของลิกโนซัลไฟเนต นอกจากนี้ยังมีกลุ่ม

olefinic, carbonyl และcatechol อย่างไรก็ตามลิกโนซัลโฟเนตไม่มีประสิทธิภาพในการลดแรงดึงผิวของน้ำหรือสร้างไมเซลล์ได้

## 2.3 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biodegradable polymer)

พอลิเมอร์ชีวภาพ (biodegradable polymer) คือ พอลิเมอร์ที่มักจะผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้โดยสิ่งแวดล้อม เช่น จุลินทรีย์ในดิน ความชื้น ความร้อนเป็นต้น ซึ่งจะแตกตัวออกมาเป็นน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารชีวมวล โดยไม่ทิ้งสารตกค้างต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตได้ เนื่องจากการผลิตพลาสติกปิโตรเลียม หรือแบบทั่วไปนั้นจะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาโลกร้อน และมลพิษทางอากาศ ช่วยเพิ่มความยั่งยืนให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าความต้องการของพอลิเมอร์ชีวภาพทั่วโลกจะเพิ่มมูลค่าขึ้นจาก 11.5 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2022 เป็น 27.3 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2027 (Market and Market, 2023)

### 2.3.1 พอลิเมอร์ชีวภาพจากสตาร์ช

สตาร์ชเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ราคาถูกและมีจำนวนมากในธรรมชาติและเป็นหนึ่งในกลุ่มพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพที่ ถูกที่สุด นอกจากนี้สตาร์ชเป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrocolloids) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ อะมิโลส (poly- $\alpha$ -1, 4-d-glucopyranoside) มีอยู่ 10-20 % อะมิโลสมีโครงสร้างแบบเกลียวและละลายในน้ำ สตาร์ชที่มักถูกนำมาใช้ในการผลิตไบโอพอลิเมอร์ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าว และข้าวโพด โดยทั่วไปสตาร์ชใช้เป็นเทอร์โมพลาสติก ด้วยการเติมน้ำ พลาสติกไฮดรอลแล้วให้ความร้อนจากนั้นทำการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความทนทานต่อความชื้นต่ำ และคุณสมบัติทางกลของสตาร์ชสามารถใช้งานได้จำกัด

### 2.3.2 พอลิเมอร์ชีวภาพจากโปรตีน

โปรตีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางวัสดุที่น่าสนใจ มีความแข็งแรงในการงอ ความต้านทานแรงเฉือน ความทนทานต่อแรงดึง รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ดี เช่น ความเหนียว ความแข็งแรง และความยืดหยุ่น เช่น เจลาติน (gelatin) เคราติน (keratin) และเคซีน (casein) ดังนั้นโปรตีนเหล่านี้มีความเหมาะสมในการสร้างพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ต่างๆ เช่นบรรจุภัณฑ์อาหารและไมใช่อาหาร และเป็นวัสดุชีวภาพ เช่นในศัลยกรรมตกแต่ง หรือวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นต้น นอกจากนี้ โปรตีนช่วยเสริมพอลิเมอร์อื่นได้ดีขึ้น โปรตีนพอลิเมอร์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยการผสมกับโปรตีนอื่น ๆ หรือโมเลกุลที่ไม่ใช่โปรตีน ในอุตสาหกรรม

บรรจุภัณฑ์อาหารฟิล์มที่ผลิตจากโปรตีน (เช่น โปรตีนนม เวย์โปรตีน เจลาติน กลูเตนข้าวสาลี ข้าวโพด เซอีน โปรตีนถั่วเหลือง ไข่ขาว ฯลฯ) ถูกใช้เป็นฟิล์มที่รับประทานได้ เพื่อให้สามารถรับประทานพร้อมกับอาหาร ส่วนในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหาร เช่น เคราติน เคซีน เซอีน เจลาติน และโปรตีนจากถั่วเหลือง มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ต่างๆ เช่น ถุงซ้อปบึง วัสดุคลุมดิน ผลิตภัณฑ์สุขอนามัยที่สามารถดักจับโครโคได การผสมผสานของโปรตีนและไมโซโปรตีนร่วมกับโมเลกุลธรรมชาติ เช่น โคโคซาน เซลลูโลส และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (พอลิโพรไพลีน พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติพลาสติกของพอลิเมอร์ที่ใช้โปรตีนให้เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและไม่ใช่อาหาร

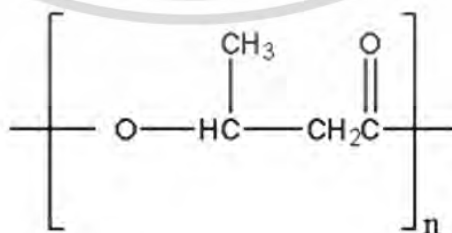
### 2.3.3 Polylactic Acid (PLA)

PLA อยู่ในกลุ่ม aliphatic polyesters ที่สร้างขึ้นจาก alpha-hydroxy acids รวมถึง polyglycolic หรือ polymandelic โดย PLA ได้มาจากการบวนการแปลงพอลิเมอร์เป็นมอนอเมอร์หรือส่วนผสมของมอนอเมอร์กรดแลคติกที่ได้จากการหมักน้ำตาล หรือข้าวโพดเป็นต้น ซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย นอกจากนี้ PLA ยังเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนแทนผลิตภัณฑ์จากน้ำมันดิบหรือปิโตรเคมี เนื่องจาก lactide ผลิตผ่านกระบวนการหมักของเชื้อจุลินทรีย์จากของเหลือทางการเกษตร ในปัจจุบัน PLA เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เพราะเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพดีกว่าพลาสติกสังเคราะห์ โดยทั่วไป PLA มักจะได้รับการควบแน่นของกรดแลคติก D หรือ L หรือเกิดจากกระบวนการพอลิเมอร์ไซเคิลของ lactide ซึ่งเป็น cyclic dimer ของกรดแลคติก ซึ่ง PLA เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารที่ดี เพราะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทนต่อการละลายน้ำง่ายต่อการแปรรูปด้วยความร้อน และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ นอกจากนี้ PLA มีความต้านทานแรงดึงสูง มีการป้องกันกลิ่น รสที่คล้ายกับ polyethylene และ PET มีความคงทนต่ออุณหภูมิและความสามารถในการแปรรูปเหมือน polystyrene โดย PLA สามารถแปรรูปได้หลายวิธี เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปแผ่น การเป่าขึ้นรูป การขึ้นรูปด้วยความร้อน และการขึ้นรูปฟิล์ม PLA สามารถรีไซเคิลได้โดยการแปลงทางเคมีกลับไปเป็นกรดแลคติก แม้ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ แต่ PLA มีความเปราะง่าย สลายตัวได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Mangaraj et al., 2017)

### 2.3.4 Polyhydroxyalkanoates (PHA)

PHA เป็นกลุ่มของ polyester ที่สร้างและสะสมด้วยกระบวนการหมักแบคทีเรียชนิดต่างๆจากน้ำตาลและไขมัน โดยโครงสร้างของ PHA ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของ 3-hydroxy fatty acid มีคุณสมบัติความร้อนเชิงกลคล้ายกับ polypropylene ซึ่งข้อดีของ PHA คือ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สามารถหาได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน สามารถ

แทนที่ปิโตรเลียม และลดก๊าซเรือนกระจก มักมีการแปรรูป PHA เป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวด ภาชนะบรรจุ แผ่นฟิล์ม แผ่นลามิเนต เส้นใย และสารเคลือบ ต่อมาได้มีการพัฒนา PHA ได้มีอนุพันธ์และโคพอลิเมอร์เกิน 100 ชนิด เช่น PHB PHV PHBV PHBO PHBH PHBD โดย PHA มีคุณสมบัติในการต้านแรงดึงที่ดี สามารถพิมพ์ได้ มีการป้องกันกลิ่นและรส ความสามารถในการปิดผนึกด้วยความร้อน ทนต่อจาระบี และน้ำมัน ทนต่ออุณหภูมิความร้อน และย่อยสลาย คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร (Mangaraj et al., 2017) ซึ่ง PHB เป็นหนึ่งใน PHA โดยโครงสร้างของ PHB เป็น  $\beta$ -hydroxy acid linear polyester แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและอาหารที่ใช้ในการหมัก โดยทั่วไปจะเป็น  $-(CH_2)_n-CH_3$  (รูปที่ 2.7) มีมวลโมเลกุลอยู่ระหว่าง 200-20,000 (Daris and Knez, 2020) PHB มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ polypropylene (PP) และ polyethylene (PE) ในการผลิต PHB ใช้วัสดุหลักจากแหล่งที่หมุนเวียนและยั่งยืน อย่างเช่น เศษอาหาร มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและย่อยสลายทางชีวภาพในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ PHB เป็นทางเลือกแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น PP และ PE โดยนักจุลชีววิทยาได้ศึกษา PHB พบว่าเป็นผลิตภัณฑ์กักเก็บคาร์บอนและพลังงานภายในวิวัฒนาการของแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างๆ นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรด้านพอลิเมอร์ยังพบว่า เป็นวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะตัวมีคุณสมบัติเหนือกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตาม PHB มีต้นทุนการผลิตที่สูง ผลผลิตต่ำ ความไวต่อการย่อยสลาย ความซับซ้อนทางเทคโนโลยี รวมถึงความยากในการสกัด เพื่อลดต้นทุนการผลิตในการแข่งขันกับต้นทุนการผลิตพลาสติกปิโตรเลียมที่ต่ำ ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนากระบวนการหมักแบคทีเรียให้มีการเพิ่มความเร็วของการเจริญเจริญของจุลินทรีย์และการสะสม PHB (Koller, 2018) จากงานวิจัยของ Mcdam et al. (2020) พบว่า PHB ความเป็นผลึก (Crystallinity) ซึ่งหมายถึงระดับความเร็วและระเบียบในโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอยู่ระหว่าง 50-80 % โดย Crystallinity มีผลต่อการจัดตำแหน่งของหมู่แทนที่ในโซ่พอลิเมอร์ ความแข็งแรงโมดูลัส ความหนา และความโปร่งแสง เป็นต้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ polyhydroxy butyrate (Daris and Knez, 2020)

## 2.4 พลาสติไซเซอร์ (plasticizer)

พลาสติไซเซอร์คือวัสดุที่เมื่อเติมลงในสารอื่นจะทำให้วัสดุนั้นนิ่มลงหรือยืดหยุ่นมากขึ้น คำว่า "พลาสติไซเซอร์" โดยทั่วไปหมายถึงวัสดุที่ใช้ในพลาสติก สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (IUPAC) ได้ให้คำจำกัดความของพลาสติไซเซอร์ไว้ว่า พลาสติไซเซอร์คือสารหรือวัสดุที่รวมอยู่ในวัสดุ (โดยปกติจะเป็นพลาสติกหรืออีลาสโตเมอร์) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ความสามารถในการใช้งาน หรือความสามารถในการขยายได้ นอกจากนี้ พลาสติไซเซอร์อาจลดความหนืดของการหลอมเหลว ลดอุณหภูมิของการเปลี่ยนอันดับที่สอง หรือลดโมดูลัสความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ (Godwin, 2000) พลาสติไซเซอร์ลดแรงระหว่างโมเลกุลทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างฟิล์มอ่อนลง และเพิ่มความคล่องตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล

พลาสติไซเซอร์เป็นวัสดุเมื่อเติมลงในพอลิเมอร์ จะทำให้เกิดความยืดหยุ่น ความทนทาน ความสามารถในการขึ้นรูปตามที่ต้องการ และความสามารถเทได้ (ผลของพลังงานหรือกำลังที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในระหว่างอนุภาค ที่จะก่อให้เกิดการอัดแน่น) เพิ่มขึ้น การเพิ่มพลาสติไซเซอร์สามารถป้องกันการหดตัวในระหว่างการเก็บรักษา และในบางกรณีอาจลดต้นทุนได้ นอกจากนี้ การผสมพลาสติไซเซอร์เข้ากับพอลิเมอร์ยังสามารถมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของพอลิเมอร์ เช่น ความหนืด ปริมาณความเป็นผลึก glass transition temperature (T<sub>g</sub>) ความแข็ง และความหนาแน่น

พลาสติไซเซอร์สามารถลดแรงเสียดทานระหว่างภายในโมเลกุลกับสายโซ่พอลิเมอร์ การเพิ่มความยืดหยุ่นของพลาสติกทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์เลื่อนมาทับกัน ดังนั้นพลาสติไซเซอร์เป็นตัวหล่อลื่นในการเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์โดยการลดความต้านทานการเลื่อนของโมเลกุลพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ถือเป็นโครงสร้างรังผึ้งสามมิติ ซึ่งความต้านทานของโครงสร้าง 3 มิติมากกว่าแรงเสียดทานภายใน มีหน้าที่เสริมความแข็งแรงของพอลิเมอร์ โดยจะลดจำนวนจุดยึดระหว่างห่วงโซ่กับห่วงโซ่ให้พอลิเมอร์เปลี่ยนรูปแบบไม่ลดการรวมตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์

ในการจำแนกประเภทของพลาสติไซเซอร์โครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อความเป็นพลาสติกของพอลิเมอร์ชีวภาพขึ้นอยู่กับประเภทของพลาสติไซเซอร์ ดังนั้นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมี หมู่ฟังก์ชัน และน้ำหนักโมเลกุล โดยพลาสติไซเซอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถแพร่กระจายเข้าไปในสายโซ่พอลิเมอร์ได้ง่ายและเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของพอลิเมอร์ น้ำมีขนาดเล็กมากในระดับโมเลกุล และนั่นเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มันเป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด น้ำถูกใช้อย่างกว้างขวางในการใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการเติมลงในเทอร์โมพลาสติกและอีลาสโตเมอร์เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมร้อน อย่างไรก็ตาม

ตาม น้ำมีความผันผวนสูงและสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น พลาสติกไซเซอร์อื่นๆ เช่น โพลีเอทิลีน จึงมักถูกเติมลงในพอลิเมอร์ร่วมกับน้ำ (Eslami et al., 2023) พลาสติกไซเซอร์และพอลิเมอร์มีปฏิกิริยาต่อกันได้สองวิธี ได้แก่ภายนอกและภายใน โดยภายนอกพลาสติกไซเซอร์มีปฏิกิริยาทางกายภาพระหว่างพลาสติกไซเซอร์และสายโซ่พอลิเมอร์ พลาสติกไซเซอร์จะเกาะติดกับพอลิเมอร์โดยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นแรงดึงดูดแบบ dipole-dipole ระหว่างโมเลกุล และอาจเป็นผลให้สูญหายไปจากการย้ายที่หรือการระเหย (Vieira et al., 2011) ในทางตรงกันข้าม ภายในพลาสติกไซเซอร์ พลาสติกไซเซอร์จะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ชีวภาพผ่านทางโคพอลิเมอร์เซชันหรือการปลูกถ่าย และกลายเป็นส่วนหนึ่งของสายโซ่พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม พลาสติกไซเซอร์แบบภายนอกถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในพอลิเมอร์ชีวภาพ เพราะว่าง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และพลาสติกไซเซอร์มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากพอลิเมอร์และพลาสติกไซเซอร์เข้ากันไม่ได้จะเกิดการแยกเฟสและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จะลดลง พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเป็นขี้ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พันธะไฮโดรเจน และความชอบน้ำ อาจเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีในการตัดสินใจว่าพลาสติกไซเซอร์และพอลิเมอร์เข้ากันได้หรือไม่ (Vieira et al., 2011) ความสามารถในการละลายน้ำของพลาสติกไซเซอร์มีความสำคัญอย่างมาก ดังนั้นพลาสติกไซเซอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลักได้แก่ ละลายน้ำได้ (ชอบน้ำ) และไม่ละลายน้ำ (ไม่ชอบน้ำ) พลาสติกไซเซอร์ที่ละลายน้ำได้ เช่น กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอลจะเพิ่มอัตราการดูดซึมน้ำ และการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์โดยการเพิ่มความไวต่อความชื้นของพอลิเมอร์ แต่พลาสติกไซเซอร์ที่ไม่ชอบน้ำ เช่น ไตรอะเซติน ไตรเอทิลซีเตรต กรดไขมัน และน้ำมันพืชมักจะปรับปรุงคุณสมบัติการป้องกันของพอลิเมอร์ โดยการปิดกั้นช่องว่างและสร้างรูปแบบที่ซับซ้อนในโครงสร้าง

กลีเซอรอลเป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ สามารถละลายน้ำ ซึ่งได้มาจากปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ของไขมันและน้ำมันในพืชไบโอดีเซล และปฏิกิริยา saponification และไฮโดรไลซิสในพืชโอเลโอเคมี มีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในรูปแบบบริสุทธิ์หรือแบบผสมในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นส่วนผสมของอาหาร ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และสุตรยา เนื่องจากมีคุณสมบัติความเป็นพิษต่ำ จึงนิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับฟิล์มที่กินได้ เนื่องจากได้รับการอนุมัติจาก FDA ให้เป็นวัตถุเจือปนอาหารที่ปลอดภัย กลีเซอรอลเป็นวัสดุที่มีขี้และไม่ระเหย มีจุดเดือดที่ 290 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแกร่งกับพอลิเมอร์ และเพิ่มระยะห่างระหว่างโมเลกุลโดยการลดพันธะไฮโดรเจนภายใน การเติมกลีเซอรอลจะช่วยลดลักษณะการเปราะและให้ความยืดหยุ่นตามที่ต้องการ

## บทที่ 3

# วัสดุและวิธีการทดลอง

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมลิกโนซัลโฟเนต

- 1) แอลคาไลกีนิน (TCI, Japan)
- 2) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Kemaus, Australia)
- 3) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (HTS-1003, LMS, Japan)
- 4) ตู้อบลมร้อน (UF110, Memmert, Germany)
- 5) ถุงพอลิเอทิลีน
- 6) เครื่องซั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (GR-200, AND, Japan)
- 7) ซ้อนตักสาร

#### 3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปฟิล์ม

- 1) Poly[(R)-3-hydroxybutyric acid] (Sigma Aldrich, Germany)
- 2) กลีเซอรอล (Kemaus, Australia)
- 3) กรดอะซิติก (J.T. Baker, USA)
- 4) ตู้อบลมร้อน (UF110, Memmert, Germany)
- 5) จานเพาะเชื้อ
- 6) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (HTS-1003, LMS, Japan)
- 7) ปีกเกอร์
- 8) ถุงมือ
- 9) ถุงพอลิเอทิลีน
- 10) คีมคีบ
- 11) อลูมิเนียมฟอยล์
- 12) ไมโครปิเปต
- 13) เครื่องซั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (GR-200, AND, Japan)
- 14) ซ้อนตักสาร

### 3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.1.3.1 การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์ม

- 1) ไมโครมิเตอร์ (Winton, Japan)

#### 3.1.3.2 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์ม

- 1) Texture analyzer (TA-XT Plus, Stable Micro System, UK)
- 2) หัววัดแบบ Tensile grip
- 3) ไม้บรรทัด
- 4) คอมพิวเตอร์
- 5) เครื่องสำรองไฟฟ้า
- 6) กรรไกร
- 7) น้ำกลั่น

#### 3.1.3.3 การวิเคราะห์การซึมผ่านของไอน้ำ

- 1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (GR-200, AND, Japan)
- 2) แก้ว
- 3) โซเดียมคลอไรด์ (Chemicals Ltd., UK)
- 4) ซิลิกาเจล
- 5) เทป
- 6) ตู้ควบคุมความชื้น (AD-80C, Andbon, China)

#### 3.1.3.4 การวิเคราะห์การดูดความชื้น

- 1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (GR-200, AND, Japan)
- 2) แก้ว
- 3) โซเดียมคลอไรด์ (Chemicals Ltd., UK)
- 4) ซิลิกาเจล
- 5) เทป
- 6) ตู้ควบคุมความชื้น (AD-80C, Andbon, China)
- 7) น้ำกลั่น

#### 3.1.3.5 การวิเคราะห์สมบัติการต้านจุลินทรีย์

- 1) หม้อนึ่งฆ่าเชื้อเชื้อไอน้ำความดันสูง (HV-85, Hirayama, Japan)

- 2) ตู๋ปลดเชื้อ
- 3) ตู๋บ่มเพาะเชื้อ
- 4) เวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 5) ตะเกียงแอลกอฮอล์
- 6) จานเพาะเชื้อพลาสติก
- 7) ไมโครปิเปต
- 8) แท่งแก้วเกลี่ยเชื้อ
- 9) Potato dextrose agar (Himedia, India)
- 10) เช็มเขี่ยเชื้อ
- 11) ปีกเกอร์
- 12) เทปพาราฟิล์ม
- 13) กรรไกร
- 14) ที่เจาะกระดาษ
- 15) คีมคีบ
- 16) ขวดแลปดูแรน
- 17) ซ้อนตักสาร
- 18) แอลกอฮอล์
- 19) *Staphylococcus aureus*

### 3.1.3.6 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

- 1) 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) (Sigma Aldrich, Germany)
- 2) 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) reagent (Sigma Aldrich, Germany)
- 3) 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) (Sigma Aldrich, Germany)
- 4) Sodium 1,2-naphthoquinone-4-sulfonate (Folin Ciocalteu reagent) (Loba chemie PVT. LTD., India)
- 5) Sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Kemaus, Australia)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) Potassium persulfate ( $K_2S_2O_8$ ) (Kemaus, Australia)
- 7) เอทานอล
- 8) ไมโครปิเปต
- 9) หลอดทดลองแก้ว
- 10) ขวดดูแลน
- 11) ปีกเกอร์
- 12) ขวดชมพู
- 13) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Genesys™ 10, Thermo Scientific, USA)
- 14) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (GR-200, AND, Japan)

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central composite design จากโปรแกรม Minitab Statistical Software โดยกำหนดตัวแปรคือ ความเข้มข้นกลีเซอรอล และความเข้มข้นลิโนลีนอล แต่แตกต่างกันตามตารางที่ 3.1 แต่ละการทดลองทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 รหัสและระดับของตัวแปรอิสระตามแผนการทดลอง Central composite design

ปัจจัย (% โดยน้ำหนัก PHB)	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย				
		-1	$-\alpha$	0	$+\alpha$	1
กลีเซอรอล	G	10.0	15.9	30	44.1	50.0
ลิโนลีนอล	S	0.0	1.8	6.0	10.2	12.0

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central composite design และรหัสของฟิล์ม

การทดลองที่	ตัวแปร		รหัส
	กลีเซอรอล (%)	ลิกโนซัลโฟเนต (%)	
1	30.0	0.0	G30S0
2	44.1	10.2	G44.1S10.2
3	50.0	6.0	G50S6
4	15.9	10.2	G15.9S10.2
5	30.0	6.0	G30S6
6	44.1	1.8	G44.1S1.8
7	15.9	1.8	G15.9S1.8
8	30.0	6.0	G30S6
9	10.0	6.0	G10S6
10	30.0	6.0	G30S6
11	30.0	12.0	G30S12
12	30.0	6.0	G30S6
13	30.0	6.0	G30S6

### 3.2.2 การเตรียมลิกโนซัลโฟเนต

นำ Alkali lignin 100 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร เติม  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  10 กรัม ลงในสารละลาย Alkali lignin ผสมด้วยเครื่องกวนแบบผสม magnetic ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้ง (ความชื้นที่ได้ 0.22 %) (Qin et al., 2015; Thungphotrakul et al., 2019)

### 3.2.3 การขึ้นรูปฟิล์ม

เตรียม PHB 0.1 กรัม ละลายในกรดอะซิติก 10 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยปิดฝาปิกเกอร์ผสมจนกว่า PHB ละลาย จากนั้นเติมกลีเซอรอล (50.0, 44.1, 30.0, 15.9 และ 10.0 % โดยน้ำหนัก PHB) และ ลิกโนซัลโฟเนต (12.0, 10.2, 6.0, 1.8 และ 0.0 % โดยน้ำหนักของ PHB) ทำการกวนผสมสารละลายเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายเทใส่

เพลท (Petri dishes) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนกว่ากรดอะซิติกจะระเหยหมด และนำไปเก็บไว้ในถุงพอลิเอทิลีน เนื่องจากต้องการป้องกันให้ฟิล์มไม่สัมผัสกับอากาศและความชื้น

### 3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม

#### 3.2.4.1 การวิเคราะห์ความหนา

นำแผ่นฟิล์มมาวัดด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ที่มีช่วงการวัดอยู่ที่ 0-25 มิลลิเมตร โดยทำการสุ่มวัด 5 จุด แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Rambabu et al., 2018)

#### 3.2.4.2 การวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง

วิเคราะห์ความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Texture analyzer ใช้หัววัดแบบ Tensile grip โดยตัดแผ่นฟิล์มขนาด 20×60 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างเริ่มต้นระหว่าง grip คือ 40 มิลลิเมตร อัตราการวัดที่ 1 มิลลิเมตร/วินาที และ ระยะการดึงที่ 20 มิลลิเมตร ดัดแปลงจาก Khodaei et al. (2020) โดยค่าความทนต่อแรงดึงสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1

$$Tensile\ strength = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

โดย F คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (นิวตัน)

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างฟิล์ม (ตารางมิลลิเมตร)

#### 3.2.4.3 การวิเคราะห์การซึมผ่านไอน้ำ

นำแผ่นฟิล์มปิดปากแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มิลลิเมตร ที่บรรจุสารละลาย NaCl อิมิตัว (ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %) วางในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30 % เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำการบันทึกผล โดยค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) คำนวณได้จากความชันของการวิเคราะห์การถดถอยของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta w$ ) ที่ผ่านพื้นที่ของฟิล์ม (A) ในช่วงเวลาหนึ่ง ( $\Delta t$ ) จากนั้น WVTR ของฟิล์มจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) โดยใช้สมการ (3.4) ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง (ดัดแปลงจาก Siripatrawan and Harte, 2010)

$$WVTR = \frac{\Delta w}{A \Delta t} \quad (3.2)$$

$$Permanance = \frac{WVTR}{\Delta p} \quad (3.3)$$

$$WVP = Permanence \times Thickness \text{ of film} \quad (3.4)$$

โดย WVP คือ ค่าการซึมผ่านไอน้ำ ( $g \text{ mm m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ )

$\Delta W/\Delta t$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลา

X คือ ความหนาฟิล์ม (มิลลิเมตร)

$\Delta p$  คือ ความต่างของความดันไอระหว่างภายใน ( $p_1$ ) และ ภายนอก ( $p_2$ )

ของฟิล์ม

#### 3.2.4.4 การวิเคราะห์การดูดความชื้น

นำแผ่นฟิล์มปิดปากแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 มิลลิเมตร ที่บรรจุ NaCl อิ่มตัว (ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %) วางในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30 % เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ทุกๆ 1 ชั่วโมง (Kumar et al., 2022)

$$\text{Moisture uptake \%} = \frac{M_0 - M_t}{M_s} \times 100 \quad (4.4)$$

โดย  $M_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง

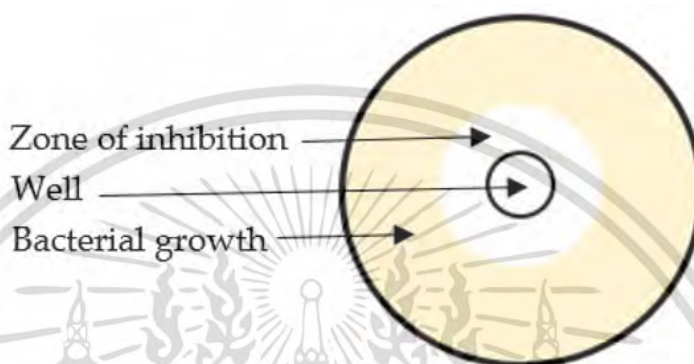
$M_t$  คือ น้ำหนักของตัวอย่าง ณ เวลา  $t$

$M_s$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง - น้ำหนักภาชนะ

#### 3.2.5 การวิเคราะห์การต้านจุลินทรีย์ของฟิล์ม

เตรียมเชื้อ *Staphylococcus aureus* และ *Aspergillus niger* ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar ลงในจานเพาะเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยตัดกระดาษกรองที่มีความเข้มข้นลิกลโนซัลโฟเนตที่แตกต่างกัน วางบนลงเพลทอาหารเลี้ยงเชื้อ potato dextrose agar ซึ่งก่อนหน้านี้ผ่านวิธีการ spread plate ด้วยเชื้อ 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปบ่มที่

อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทุกขั้นตอนต้องทำการโดยปราศจากเชื้อ (aseptic technique) โดยการวิเคราะห์การต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มสังเกตจากโซนที่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ หรือที่เรียกว่า inhibition zones มีลักษณะเป็นวงใส (รูปที่ 3.1) จากนั้นทำการวัด inhibition zones ด้วยเวอเนียร์ โดยจะวัด 8 ค่า แล้วนำค่ามาเฉลี่ย ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 3.1 inhibition zone (Hossain et al., 2022)

### 3.2.6 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์ม

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มด้วยวิธี Folin Ciocalteu โดยนำสารละลายตัวอย่างฟิล์มในเอทานอล 2.5 มิลลิลิตร นำสารละลายตัวอย่างผสมกับสารละลาย Folin Ciocalteu reagent (10 % โดยปริมาตรต่อปริมาตร) 0.3 มิลลิลิตร และ sodium carbonate (7.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 2 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที จากนั้นนำส่วนผสมวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน 0-1000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (Rambabu et al., 2018)

### 3.2.7 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม

#### 3.2.7.1 การวัดด้วยวิธี DPPH

นำสารละลายตัวอย่าง 1.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย DPPH (0.1mM) 0.5 มิลลิลิตร ทำการเขย่าสารละลายแล้วนำเก็บไว้ที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ซึ่งค่าดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่างนำมาคำนวณความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน 0-1000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร จากสมการ 6 (Rambabu et al., 2018)

$$DPPH \text{ scavenging effect (\%)} = \frac{A_{control} - A_{sample}}{A_{control}} \times 100 \quad (3.6)$$

โดย  $A_{control}$  คือ ค่าการดูดกลืนของสารละลาย DPPH

$A_{sample}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง

### 3.2.7.2 การวัดด้วยวิธี ABTS

เตรียมสารละลาย ABTS 7 mM ด้วยน้ำกลั่น ผสมกับสารละลาย potassium persulfate 2.45 mM สัดส่วน 1:1 (เก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง) จากนั้นนำสารละลายมาปรับความเข้มข้นด้วยเอทานอลให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง  $0.70 \pm 0.02$  ที่ 735 นาโนเมตร นำสารละลายตัวอย่าง 20 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายที่ผ่านการปรับความเข้มข้น 1980 ไมโครลิตร ที่งไว้ในที่มีอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 735 นาโนเมตร โดยใช้ Trolox เป็นสารมาตรฐาน 0-1000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (Rambabu et al., 2018)

### 3.2.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มด้วยวิธี Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

นำฟิล์มตัวอย่างตัดให้มีขนาด  $2 \times 2$  เซนติเมตร วิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มตัวอย่างด้วย FTIR (Spectrum two, Perkin Elmer, USA) ถูกบันทึกด้วย % transmittance สเปกตรัมอินฟราเรดในช่วง  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$  และ resolution ที่  $4 \text{ cm}^{-1}$  ด้วย 32 แสแกน โดย

### 3.2.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Turkey test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ด้วยโปรแกรม SPSS (IBM, Armonk, United States) ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Respond surface methodology, RSM) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

## บทที่ 4

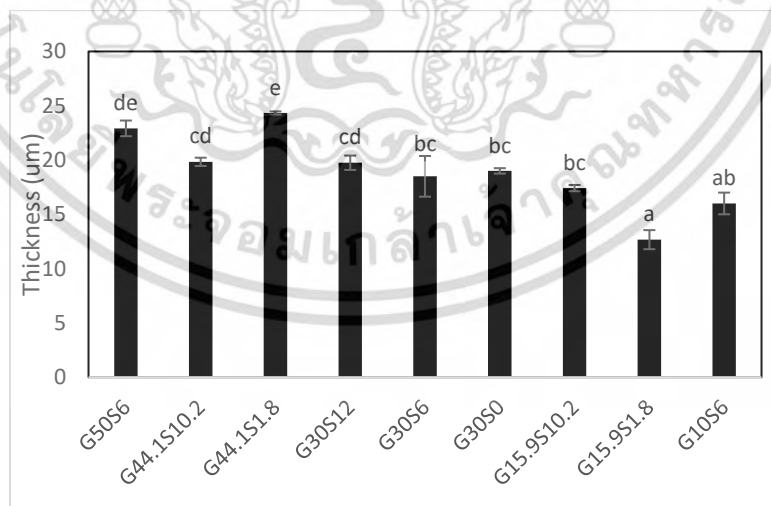
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลของการเติมกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตแตกต่างกันต่อคุณสมบัติของฟิล์ม

จากการทดลองขึ้นรูปฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต 0.1 กรัม โดยใช้ลิกโนซัลโฟเนตที่มีความเข้มข้น 0.0, 1.8, 6.0, 10.2 และ 12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB และกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 10.0, 15.9, 30.0, 44.1 และ 50.0 % โดยน้ำหนักของ PHB ทั้งหมด 9 ตัวอย่าง โดยรหัสของฟิล์มแสดงในตารางที่ 3.2 โดยฟิล์มที่ได้จะถูกวิเคราะห์คุณสมบัติ ได้แก่ ความหนา, ความทนทานต่อแรงดึง, การซึมผ่านไอน้ำ และการดูดความชื้น

##### 4.1.1 ความหนา

ผลการวัดความหนาของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตร่วมกับลิกโนซัลโฟเนตและกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าค่าความหนาสูงที่สุดคือ  $24.3 \pm 0.1$  ไมครอน โดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 44.1 และ 1.8 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ และค่าความหนาต่ำสุดคือ  $12.7 \pm 0.9$  ไมครอน โดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 15.9 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 1.8 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ซึ่งกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตมีอิทธิพลร่วมกันต่อความหนาของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.1 ความหนาของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6

\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซัลโฟเนต (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

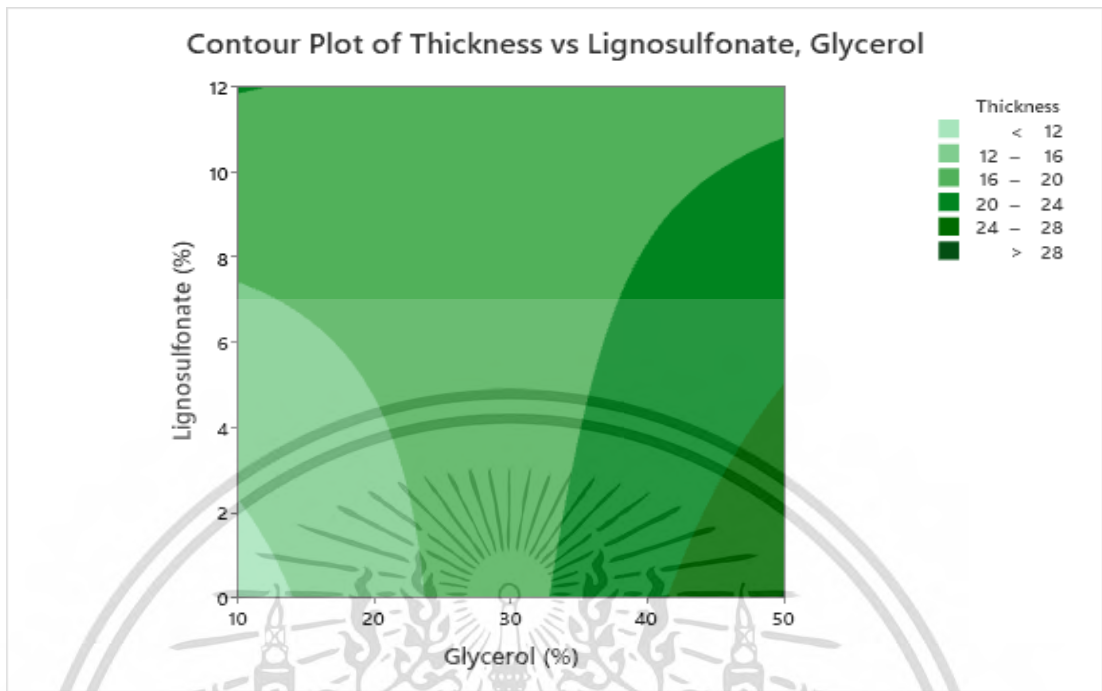
**ตารางที่ 4.1** อิทธิพลของกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อคุณสมบัติของฟิล์ม

ปัจจัย	P value			
	ความหนา	ความทนต่อแรงดึง	การซึมผ่านไอน้ำ	การดูดความชื้น
กลีเซอรอล	0.00*	0.00*	0.13	0.60
ลิกโนซัลโฟเนต	0.58	0.87	0.01*	0.00*
กลีเซอรอล*ลิกโนซัลโฟเนต	0.00*	0.00*	0.10	0.00*

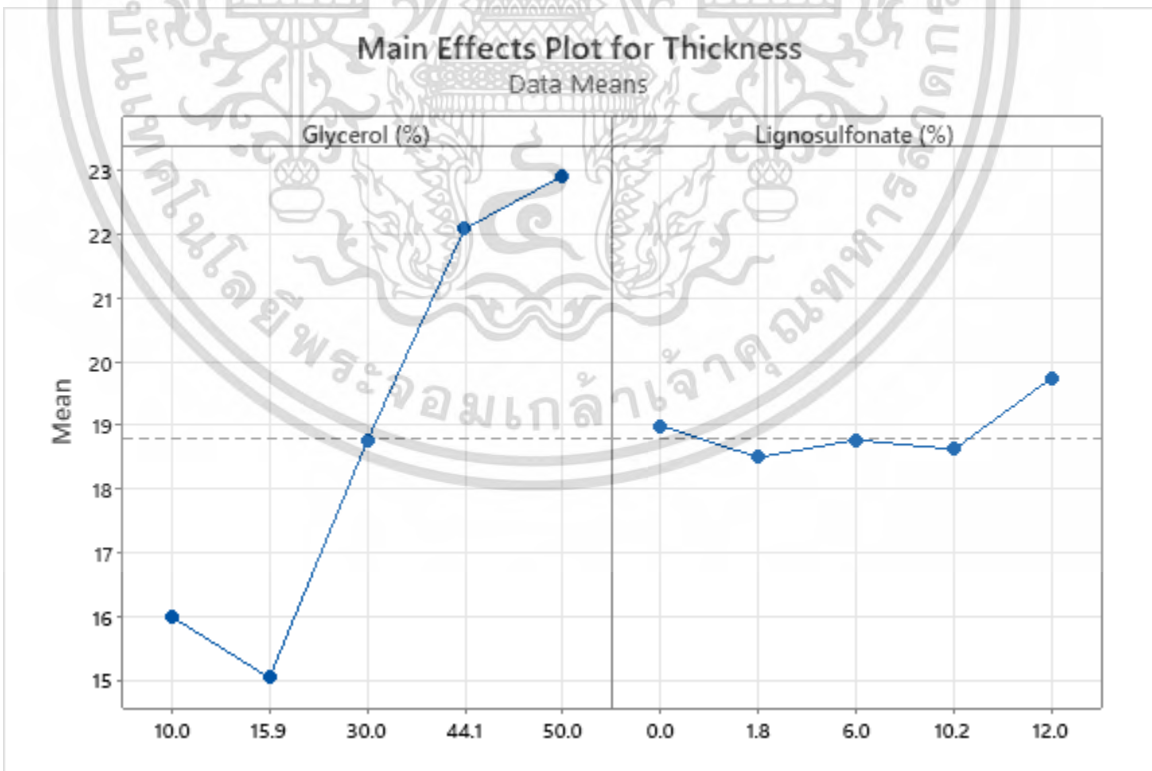
\*แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p < 0.05$ )

จากรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเข้มข้นกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต พบว่าค่าความหนาที่มากที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ประมาณ 40-50 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 0-4 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่น้อยที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 10-15 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 0-2 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลีเซอรอลมีผลต่อความหนาของฟิล์ม เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและเพิ่มความหนาของฟิล์ม เนื่องจากกลีเซอรอลดูดน้ำและลดอัตราการส่งผ่านไอน้ำทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น การวิจัยของ Jouki et al. (2013) สํารวจพบว่าการเพิ่มกลีเซอรอลเพิ่มความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ Admase et al. (2022) พบว่าการเพิ่มกลีเซอรอลเสริมเนื้อแน่นโดยลดขนาดรูในระหว่างอนุภาค ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มลิกโนซัลโฟเนตไม่มีอิทธิพลต่อความหนาของฟิล์ม (ตารางที่ 4.1)

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเพิ่มกลีเซอรอลทำให้ค่าความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เติมกลีเซอรอล 15.9 % โดยน้ำหนักของ PHB ทำให้ค่าความหนาลดลง และจากรูปจะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นลิกโนซัลโฟเนตมีผลต่อความหนาใกล้เคียงกัน และจากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นเส้นขนานซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตมีอิทธิพลร่วมกัน

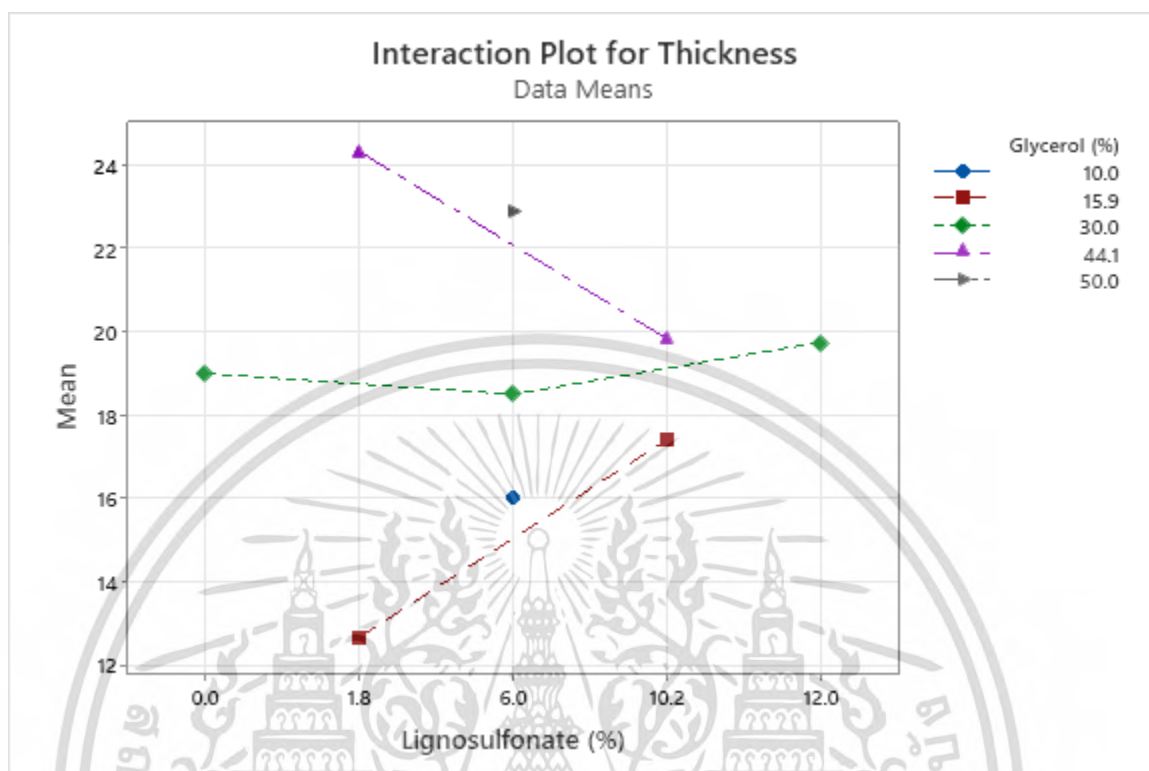


รูปที่ 4.2 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต



รูปที่ 4.3 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของความหนาของฟิล์ม

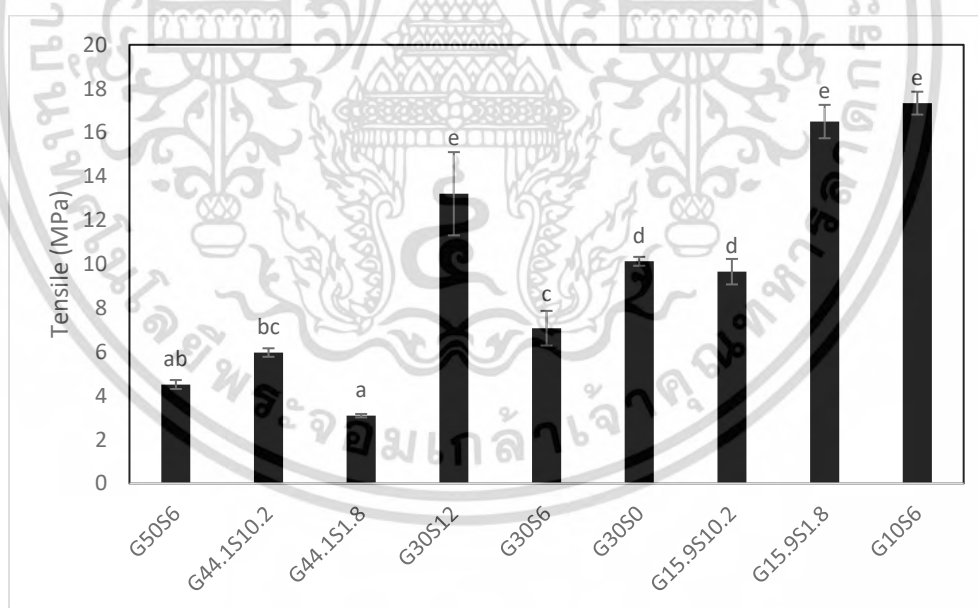
#### 4.1.2 ความทนทานต่อแรงดึง

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความทนทานต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโดยใช้ลิกโนซัลโฟเนตและกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด คือ  $17.34 \pm 0.52$  เมกะปาสคาล โดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 10.0 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 6.0 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ซึ่งกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตมีอิทธิพลร่วมกันต่อความทนทานต่อแรงดึงของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.1)

จากรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงที่มากที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ประมาณ 10-15 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 0-2 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ค่าความทนทานต่อแรงดึงที่น้อยที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 40-50 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 0-8 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลีเซอรอลมีผลต่อความทนทานต่อแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากกลีเซอรอลมีผลต่อการจัดเรียงของโซ่พอลิเมอร์และพันธะ

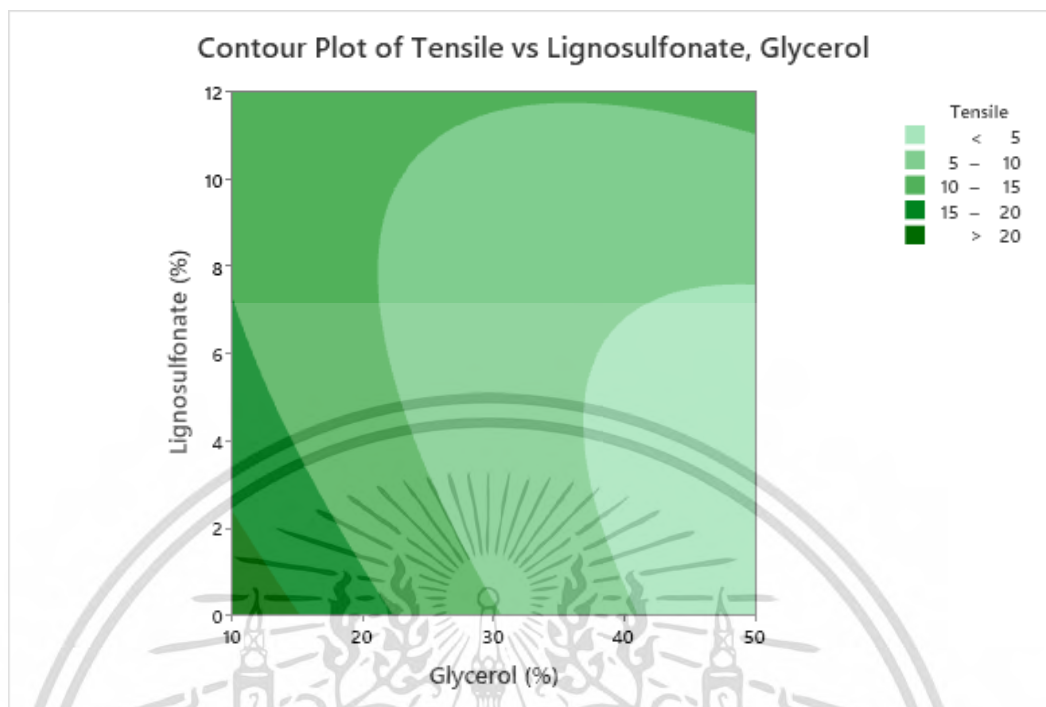
ไฮโดรเจน อีกทั้งยังส่งผลต่อการเชื่อมติดกันของพอลิเมอร์และมีผลต่อความยืดหยุ่นและคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของฟิล์ม (Laohakunjit et al., 2004) โดยงานวิจัยของ Zakaria et al., 2018 พบว่าฟิล์มเทอร์โม-พลาสติกสตาบิลจากมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอล 10 % มีค่าความทนทานต่อแรงดึงมากที่สุดคือ 13 เมกะปาสคาล ฟิล์มที่มีกลีเซอรอลอยู่ 70 % มีค่าความทนทานต่อแรงดึงน้อยที่สุดคือ 0.7 เมกะปาสคาล เนื่องจากว่ากลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอร์ซึ่งการเพิ่มปริมาณพลาสติกไฮเซอร์ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง และกลีเซอรอลมีแนวโน้มที่จะดูดซับความชื้นซึ่งทำให้ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มอ่อนแอลง ในทางกลับกันการเพิ่มลิกโนซัลโฟเนตไม่มีอิทธิพลต่อความหนาของฟิล์ม (ตารางที่ 4.1)

จากรูปที่ 4.7 เพื่อเพิ่มความเข้มข้นกลีเซอรอล 10.0-44.1 % โดยน้ำหนักของ PHB ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง และมีความทนทานต่อแรงดึงเท่ากันเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกลีเซอรอล 44.1-50.0 % โดยน้ำหนักของ PHB ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นลิกโนซัลโฟเนตมีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน ยกเว้นความเข้มข้นลิกโนซัลโฟเนต 12 % โดยน้ำหนักของ PHB ทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นเส้นขนานซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตมีอิทธิพลร่วมกันต่อความทนทานต่อแรงดึง

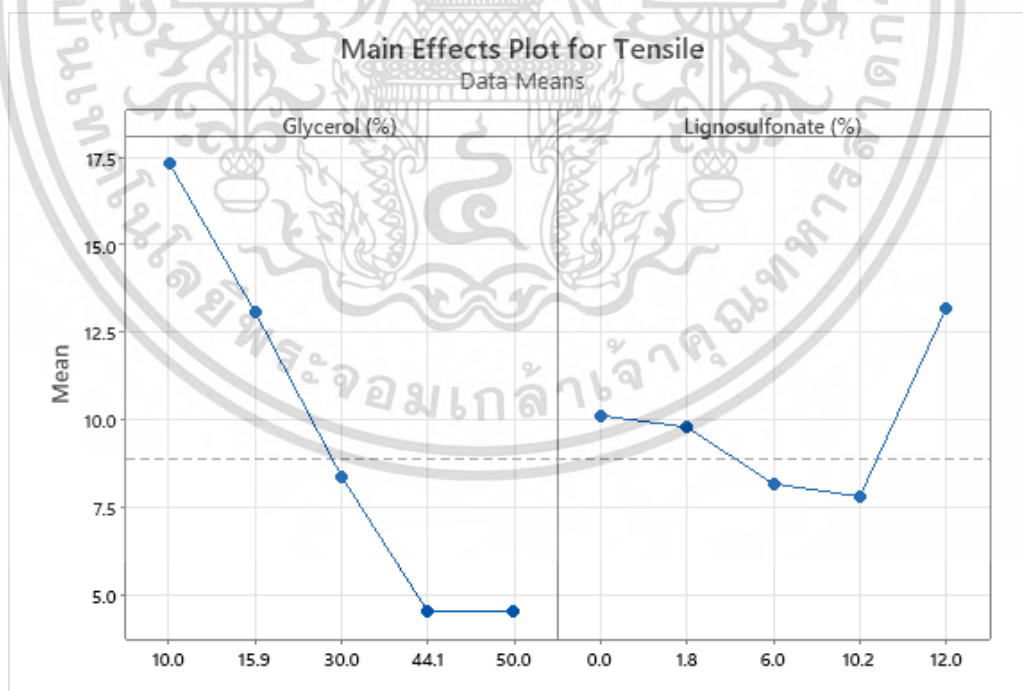


รูปที่ 4.5 ความทนต่อแรงดึงของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6

\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซัลโฟเนต (%)

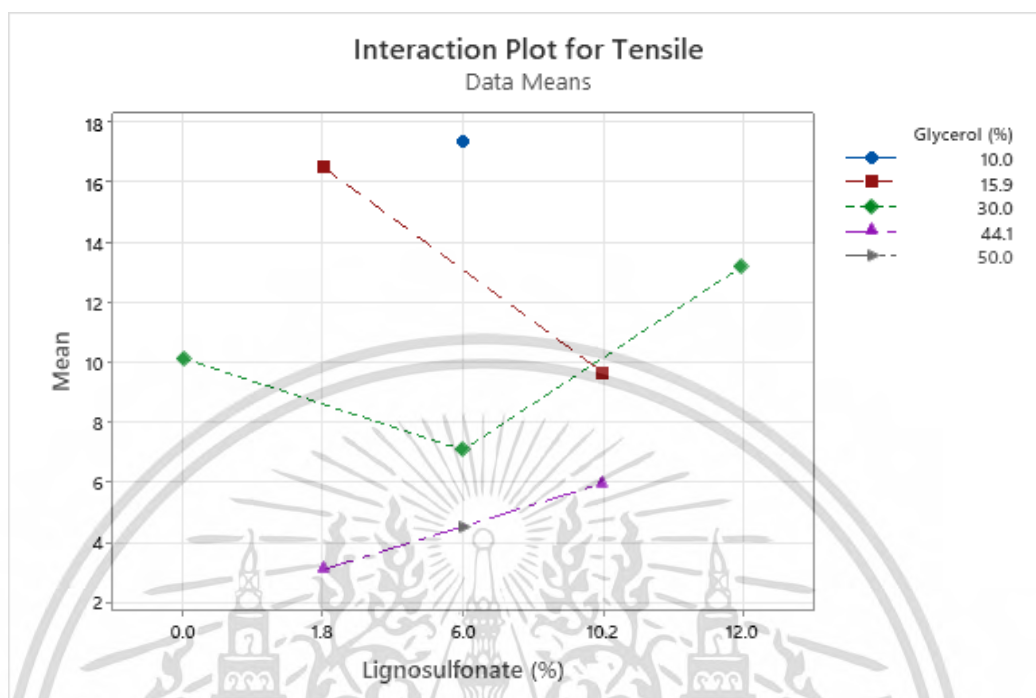


รูปที่ 4.6 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อแรงดึงของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต



รูปที่ 4.7 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อความทนทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

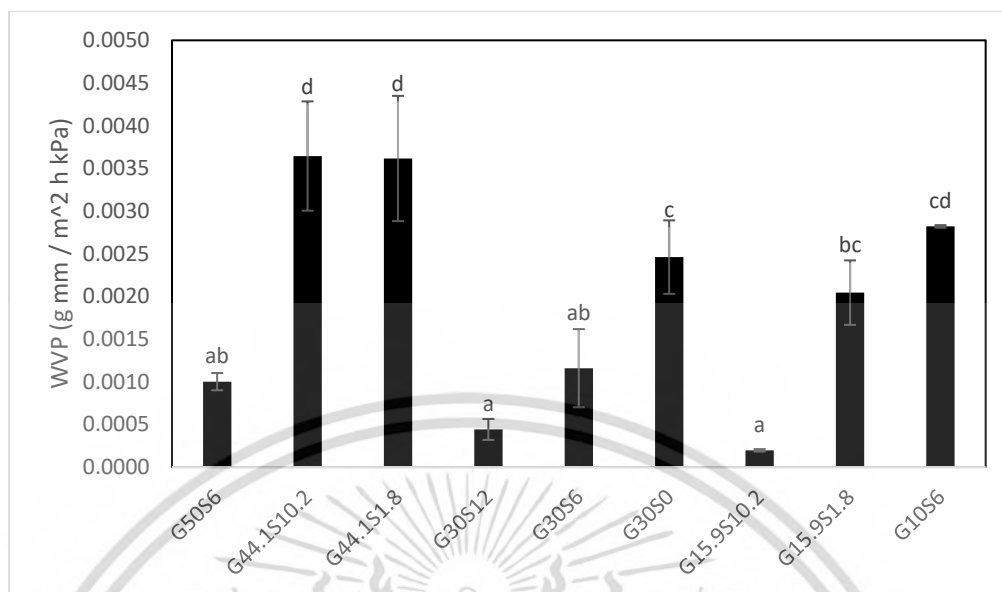


รูปที่ 4.8 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของความทนทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

#### 4.1.3 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และค่าการดูดความชื้น

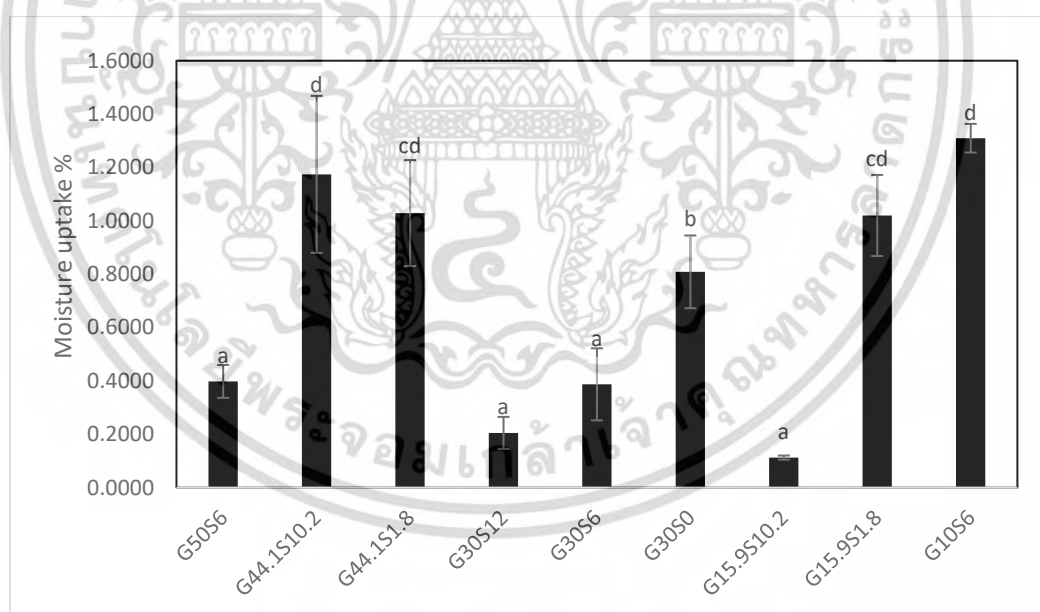
ผลของการวิเคราะห์ค่าการซึมผ่านไอน้ำและค่าการดูดความชื้นของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต โดยใช้ลิกโนซัลโฟเนตและกลีเซอรอลแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งเป็นการแสดงการซึมผ่านไอน้ำและการดูดความชื้นที่สามารถไหลผ่านหรือซึมผ่านผิวของฟิล์มโดยจะมีผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงมีการควบคุมป้องกันความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำผ่านและการดูดความชื้นฟิล์มเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับบรรจุภัณฑ์ พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มน้อยที่สุดคือ  $0.0002 \pm 0.0000$  g mm / m<sup>2</sup> h kPa และค่าการดูดความชื้นของฟิล์มน้อยที่สุดคือ  $0.0182 \pm 0.0009$  %/ชั่วโมง โดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 15.9 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 1.8 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ซึ่งกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำ แต่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าการดูดความชื้นของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6

\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซัลไฟเฟน (%)



รูปที่ 4.10 การดูดความชื้นของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6

\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซัลไฟเฟน (%)

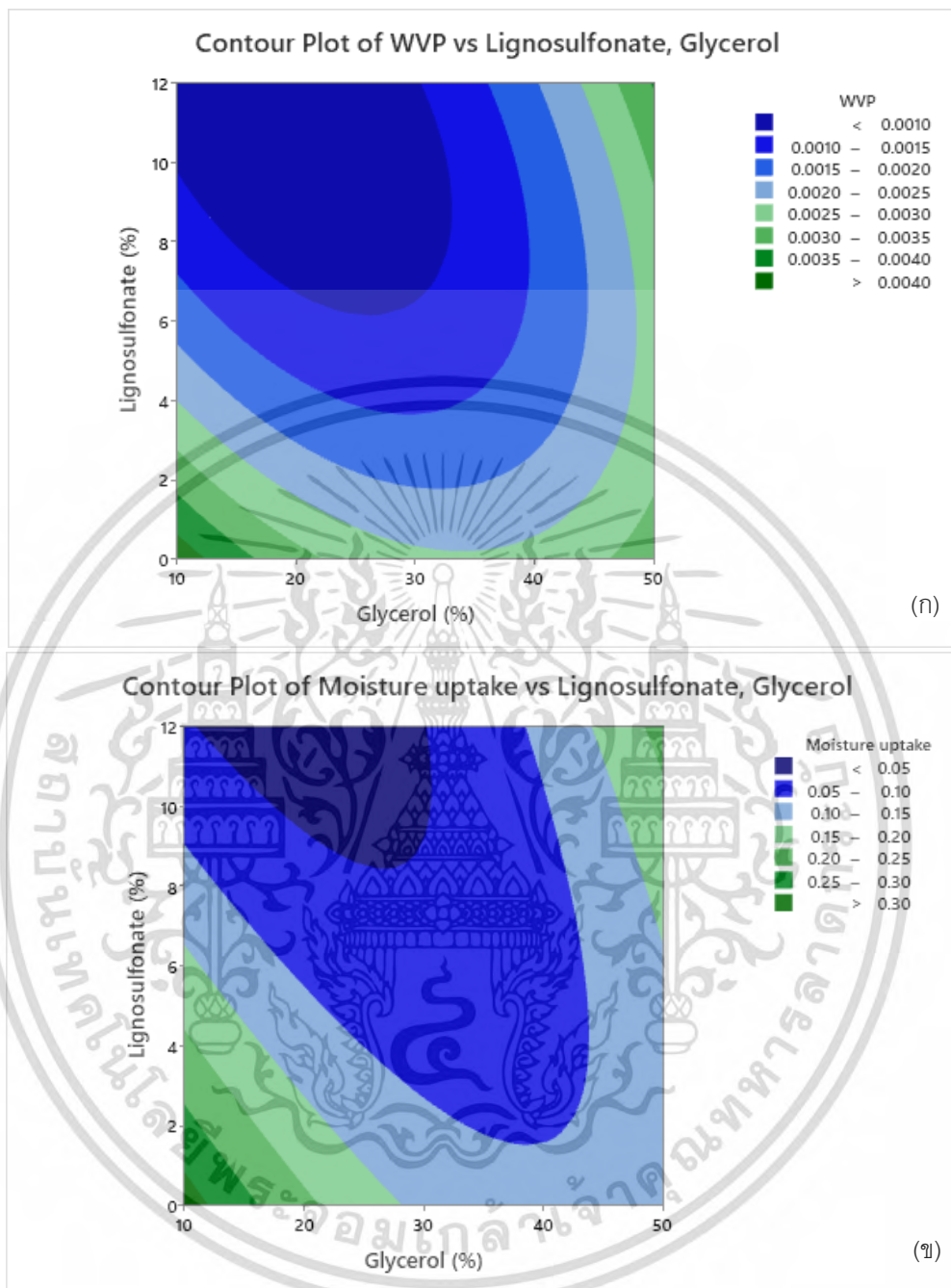
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิโนลิลโพลีฟีนอล พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำที่น้อยที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิโนลิลโพลีฟีนอลที่ประมาณ 10-30 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 10-12 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ และรูปที่ 4.11 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดความชื้นของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิโนลิลโพลีฟีนอล พบว่าค่าการดูดความชื้นที่น้อยที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิโนลิลโพลีฟีนอลที่ประมาณ 15-30 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 8-12 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นลิโนลิลโพลีฟีนอลช่วยลดปริมาณการซึมผ่านของไอน้ำโดยค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลงมากที่สุดคือฟิล์มที่มีลิโนลิลโพลีฟีนอล 12 % พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพลดลงด้วยการเพิ่มนาโนฟิลเลอร์ Zadeh et al. (2018) พบว่าการเพิ่มลิแกนด์ลงในฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่ถูกปรับเปลี่ยนด้วยเอนไซม์ช่วยให้ฟิล์มมีคุณสมบัติกันไอน้ำได้ดีมากขึ้นถึง 50 % โดยประโยชน์ของลิแกนด์อาจทำหน้าที่เป็นวัตถุที่ช่วยให้คุณสมบัติกันไอน้ำกับฟิล์ม Zhu et al. (2024) ได้ผลการทดลองว่าการเพิ่มลิโนลิลโพลีฟีนอลทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลงเกิดจากการสร้างโครงสร้างของพอลิเมอร์จากโคโตซานและลิโนลิลโพลีฟีนอลที่เป็นพอลิเอ็กโซโพลีโพรพิลีนคอมเพล็กซ์ ในส่วนของการดูดความชื้น พบว่าการดูดความชื้นของฟิล์มทั้ง 9 แผ่นมีการดูดความชื้นที่เพิ่มขึ้นทุกๆ ชั่วโมง โดยฟิล์มที่มีความสามารถในการดูดความชื้นประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้ฟิล์มมีการซึมผ่านไอน้ำได้สูงเช่นกัน โดยจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในฟิล์มนั้นๆ มีคุณภาพ อายุการเก็บรักษาที่น้อยลง ดังนั้นฟิล์มที่ดีควรมีการมีการดูดซึมความชื้นน้อย การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นลิโนลิลโพลีฟีนอลสามารถลดการดูดความชื้น Ruwoldt and Opedal (2022) พบว่าเมื่อเพิ่มลิแกนด์ 10 % ขึ้นไปสามารถเพิ่มการดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยลิแกนด์จะเข้าไปเติมช่องว่างภายในโครงสร้างทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดความชื้นลดลง งานวิจัยของ Huang et al. (2003) พบว่าการเพิ่มปริมาณลิโนลิลโพลีฟีนอลช่วยลดการดูดน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการดูดน้ำของแผ่นพลาสติกจากโปรตีนถั่วเหลืองลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณลิโนลิลโพลีฟีนอลจนถึง 40 % เนื่องจากกลุ่มซัลโฟนิคแอซิดของลิโนลิลโพลีฟีนอลเป็นสารไฮโดรฟิลิกและยังเป็น macromolecules ที่จับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ยังคงมีส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก จึงช่วยเสริมความต้านทานต่อน้ำและลดการขยายตัวเป็นผลจากการเกิดโครงสร้างร่างแห ดังนั้นลิโนลิลโพลีฟีนอลสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อน้ำได้ ในทางกลับกันลิโนลิลโพลีฟีนอลไม่มีอิทธิพลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำและค่าการดูดความชื้นของฟิล์ม (ตารางที่ 4.1)

จากรูปที่ 4.12 (ก) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกลีเซอรอล 10-15.9 และ 44.1-50 % โดยน้ำหนักของ PHB มีผลให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง แต่ความเข้มข้นกลีเซอรอล 15.9-44.1 % โดยน้ำหนักของ PHB มี

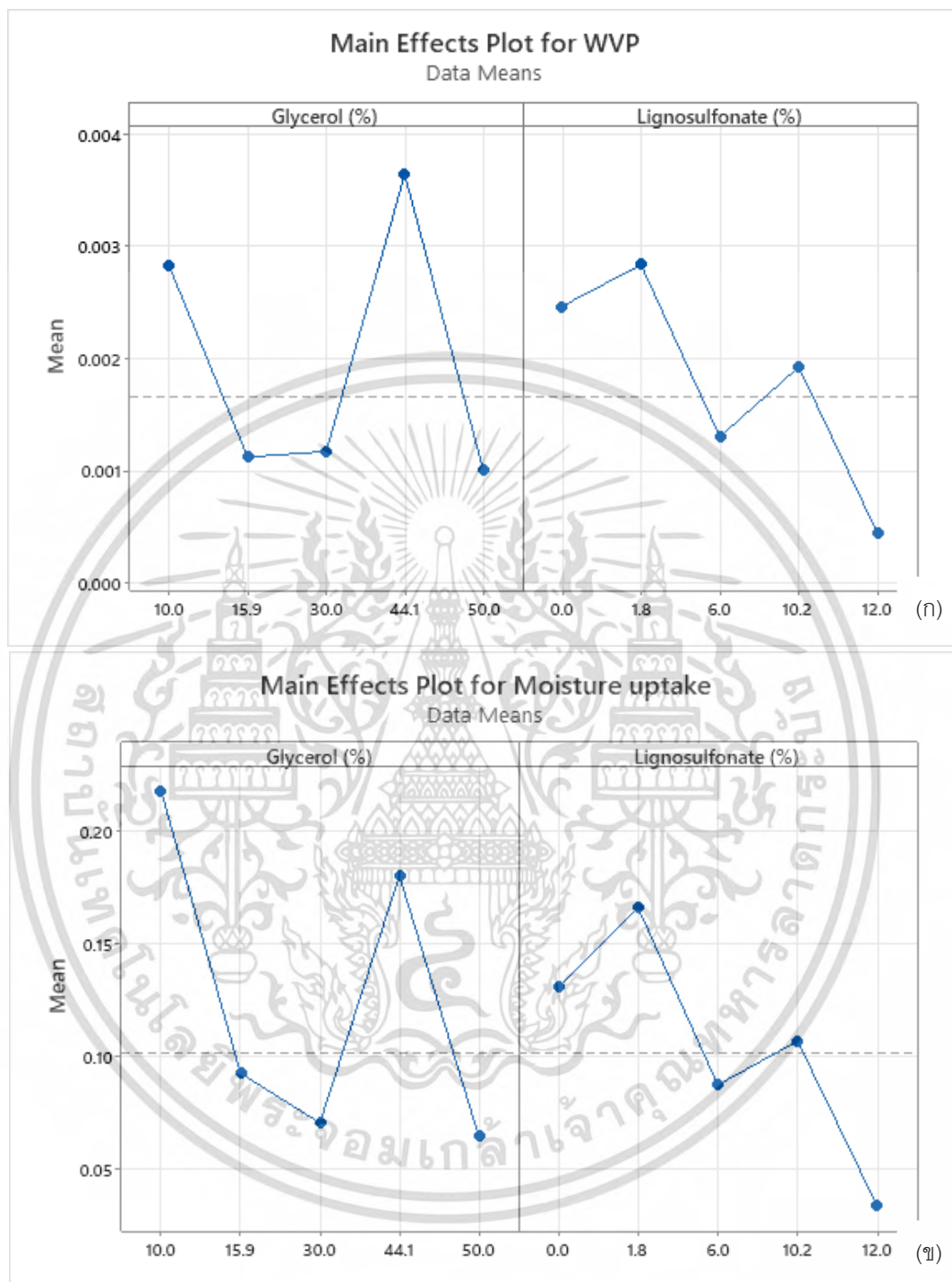
ผลให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น และรูปที่ 4.12 (ข) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกลีเซอรอล 10.0-30.0 และ 44.1-50.0 % โดยน้ำหนักของ PHB มีผลให้ค่าการดูดความชื้นลดลง แต่ความเข้มข้นกลีเซอรอล 30.0-44.1 % โดยน้ำหนักของ PHB มีผลให้ค่าการดูดความชื้นเพิ่มขึ้น ส่วนลิกโนซัลโฟเนตจากรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ 1.8-6.0 และ 10.2-12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB มีผลให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง และมีการเพิ่มขึ้นของค่าการซึมผ่านไอน้ำเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 0.0-1.8 และ 6.0-10.2 % โดยน้ำหนักของ PHB และจากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นเส้นขนานซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตมีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำ แต่จากการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4.1) อิทธิพลร่วมไม่ถึงระดับนัยสำคัญจึงเป็นผลให้กลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อความทนทานต่อแรงดึง ส่วนรูปที่ 4.13 (ข) แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นเส้นขนานซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตมีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าการดูดความชื้น





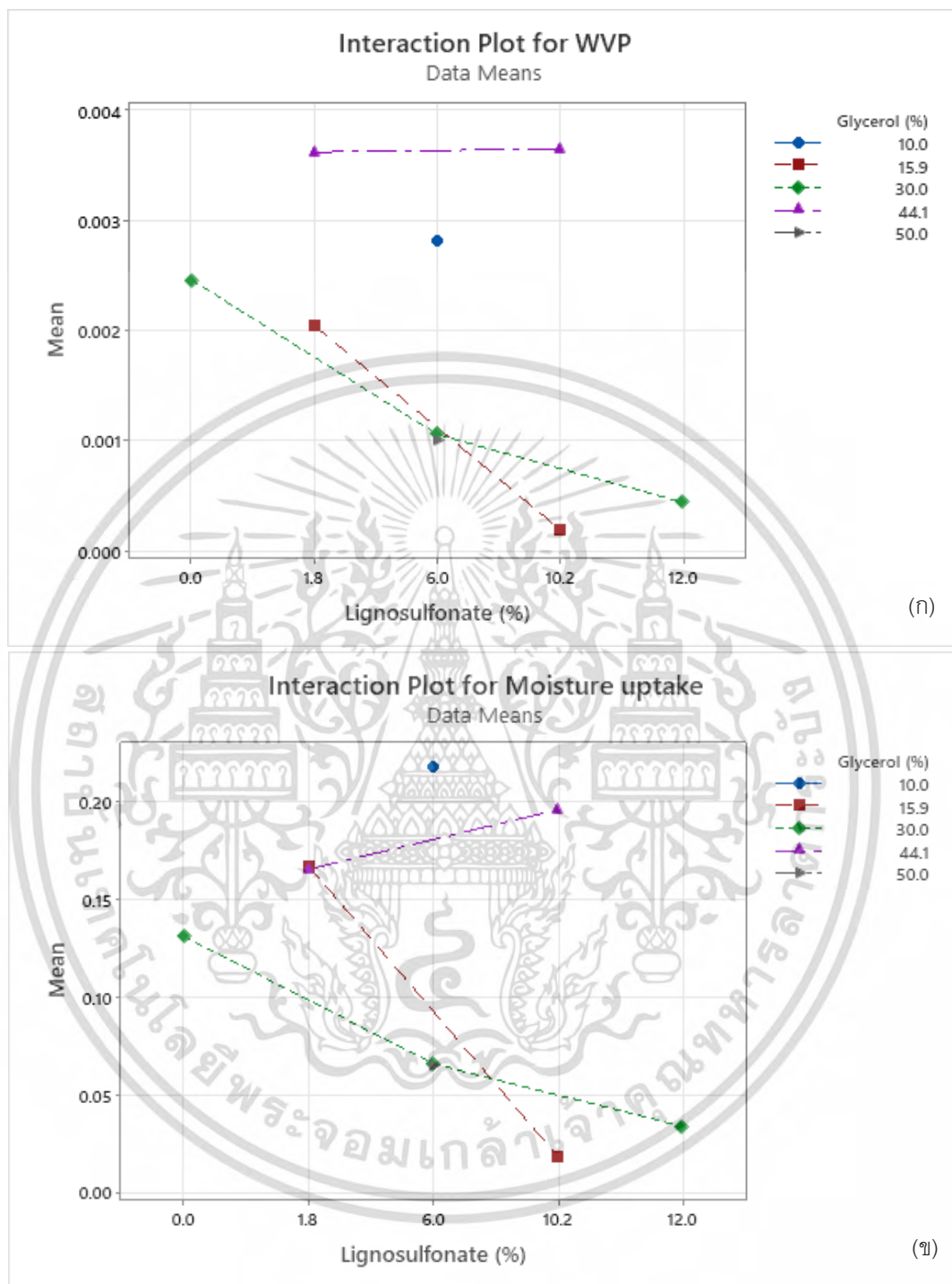
รูปที่ 4.11 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) การซึมผ่านไอน้ำ และ (ข) การดูดความชื้นของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อ (ก) ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และ (ข) การดูดความชื้นของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของ (ก) ค่าการซึมผ่านไอน้ำ และ (ข) การดูดความชื้นของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลของการเติมลิโนลัลโฟเนตต่อการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต

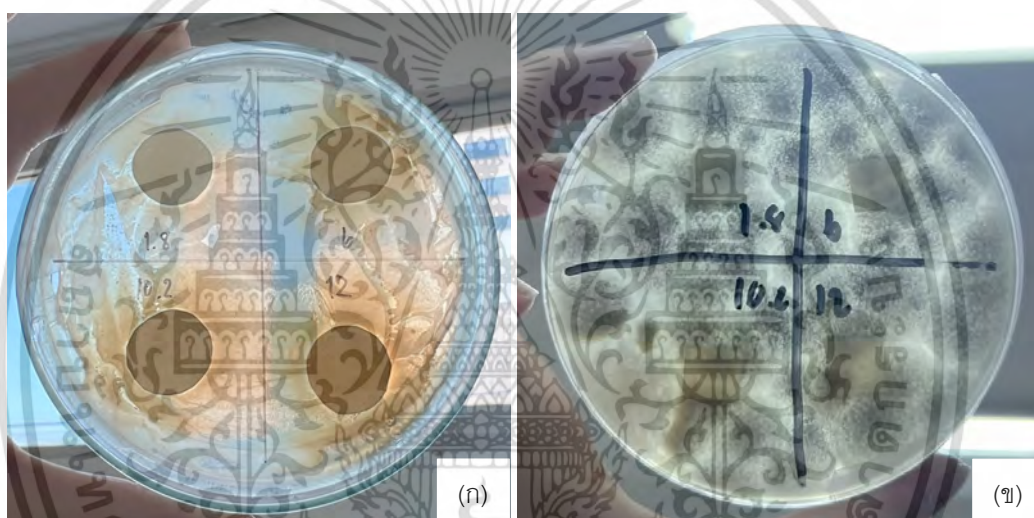
ผลของการวิเคราะห์ค่าการทดสอบพื้นที่การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย คือ *Staphylococcus aureus* และ *Aspergillus niger* เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่การยับยั้งบริเวณอาหารที่มีเชื้อปกคลุมอยู่ เพื่อสังเกตและการวัดบริเวณวงกลมใสรอบๆตัวอย่างตามรูปที่ 4.14 (ก) ซึ่งพื้นที่การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของลิโนลัลโฟเนตมากขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก *S. aureus* เป็นแบคทีเรียที่ส่งผลต่ออาหารจำพวกเนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์จากไข่ อาหารประเภทสลัด ผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์นม เป็นต้น ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษเกิดจากการรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อน มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง อีกทั้งยังเป็นสาเหตุทำให้อาหารเสียได้ง่าย จึงมีการพัฒนาฟิล์มที่มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียชนิดนี้ ลิกนินเป็นสารธรรมชาติที่มีฤทธิ์ต้านการเจริญของจุลินทรีย์ โดยสามารถอธิบายการยับยั้งได้จากการมีอยู่ของพันธะคู่ C=C และหมู่เมทิลที่ตำแหน่งแกรมมา ลิกนินเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่มีกลุ่มฟีนอลิกของพันธะคู่ C-C ในตำแหน่ง แอลฟา และเบต้า จากงานวิจัยของ Kaur et al. (2017) พบว่าลิกนินมีการแทนที่ในวงเบนซีนของพอลิเมอร์ฟีนอลิกส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรีย Solihat et al. (2021) พบว่าการเจริญของเชื้อและการย่อยด้วยเอนไซม์ถูกยับยั้งด้วยมอนอเมอร์ฟีนอลิกของลิกนิน ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่ในการสร้างความเสียหายและสลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย งานวิจัยของ Xu et al. (2021) พบว่าลิกนินความเข้มข้น 40 % มีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรีย *S. aureus* 95 % จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางชีวการแพทย์ได้

ผลของการวิเคราะห์ค่าการทดสอบพื้นที่การยับยั้งเชื้อ *Aspergillus niger* พบว่าไม่พบพื้นที่การยับยั้งเชื้อแสดงในรูปที่ 4.14 (ข)

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบพื้นที่การยับยั้งเชื้อที่มีความเข้มข้นลิโนลลิกโพลีฟีนอลแตกต่างกัน

ลิโนลลิกโพลีฟีนอล (%)	พื้นที่การยับยั้งเชื้อ (มม.)	
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Aspergillus niger</i>
1.8	0.18±0.09 <sup>a</sup>	N/A
6.0	0.69±0.20 <sup>ab</sup>	N/A
10.2	1.41±0.38 <sup>b</sup>	N/A
12.0	2.72±0.59 <sup>c</sup>	N/A

หมายเหตุ <sup>a,b,c</sup> แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )



รูปที่ 4.14 การต่อต้านจุลินทรีย์ของความเข้มข้นลิโนลลิกโพลีฟีนอลแตกต่างกัน

(n) *Staphylococcus aureus* และ (ข) *Aspergillus niger*

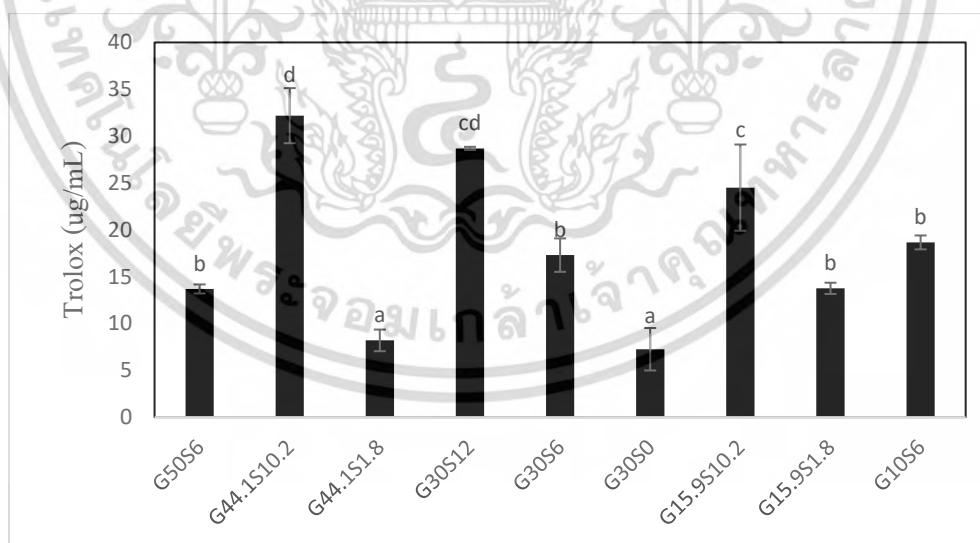
#### 4.3 ผลของการเติมกลีเซอรอลและลิโนลลิกโพลีฟีนอลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต

ผลของการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดด้วยวิธี Folin ciocalteu ของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิโนลลิกโพลีฟีนอลแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดสูงสุดคือ  $32.18 \pm 2.94 \mu\text{g Trolox/mL}$  โดยมีกลีเซอรอลและลิโนลลิกโพลีฟีนอลที่ 44.1 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 10.2 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของทั้งกลีเซอรอลและลิโนลลิกโพลีฟีนอลมีอิทธิพลร่วมกันต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดด้วยวิธี Folin ciocalteu ของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

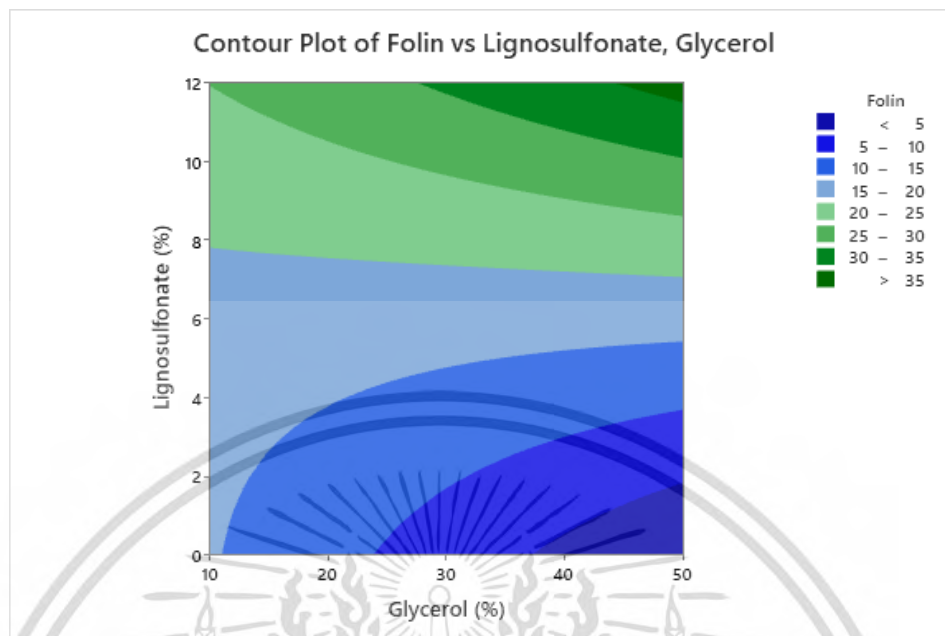
จากรูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซิลโฟเนต พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่มากที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซิลโฟเนตที่ประมาณ 50 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 12 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ส่วนปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดที่น้อยที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซิลโฟเนตที่ 40-50 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 0-2 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของลิกโนซิลโฟเนตส่งผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดให้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากลิกโนซิลโฟเนตเป็นสารที่มีสารประกอบฟีนอลิกจึงเป็นผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันพบว่าการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลไม่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (ตารางที่ 4.3) เนื่องจากว่าสารประกอบฟีนอลิกเป็นอนุพันธ์ของวงเบนซีนและมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งกลีเซอรอลประกอบด้วย 3 หมู่ไฮดรอกซิล โดย -OH เกาะอยู่ที่อะตอมคาร์บอน จึงคาดว่ากลีเซอรอลไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

จากรูปที่ 4.17 เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นลิกโนซิลโฟเนตมีผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น และจากรูป 4.18 แสดงให้เห็นว่าเส้นของความเข้มข้นกลีเซอรอล 15.9 และ 30 % โดยน้ำหนักของ PHB มีลักษณะเป็นเส้นขนานซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากลีเซอรอลและลิกโนซิลโฟเนตไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

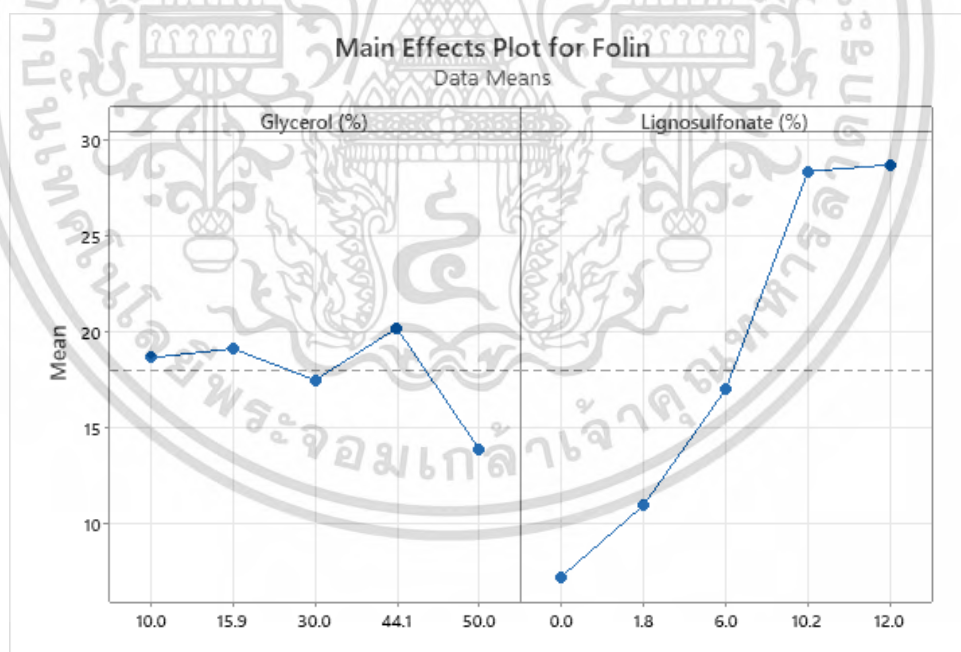


รูปที่ 4.15 ค่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 ด้วยวิธี Folin Ciocalteu reagent

\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซิลโฟเนต (%)

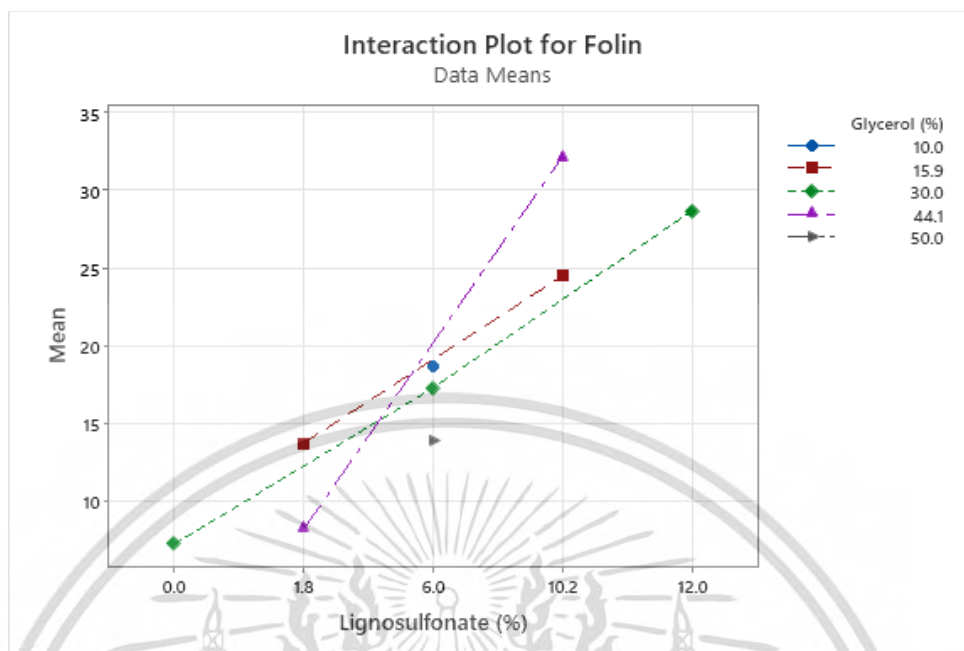


รูปที่ 4.16 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของฟิล์มกับ กลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต



รูปที่ 4.17 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 การศึกษา อิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของแผ่นฟิล์ม

ผลของการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตด้วยวิธี DPPH และ ABTS แสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ โดยฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ส่งผลให้คุณภาพของอาหารเสื่อมลง เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลง อีกทั้งยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้มากขึ้น พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดด้วยวิธี DPPH คือ  $19.03 \pm 0.86$  % โดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 30.0 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับและวิธี ABTS คือ  $11.17 \pm 0.46$  % โดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ 44.1 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 10.2 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ ซึ่งกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.3)

จากรูปที่ 4.21 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตด้วยวิธี DPPH พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่มากที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ประมาณ 30 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 8-12 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากรูปที่ 4.21 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มกับกลีเซอรอลและลิกโนซัล-

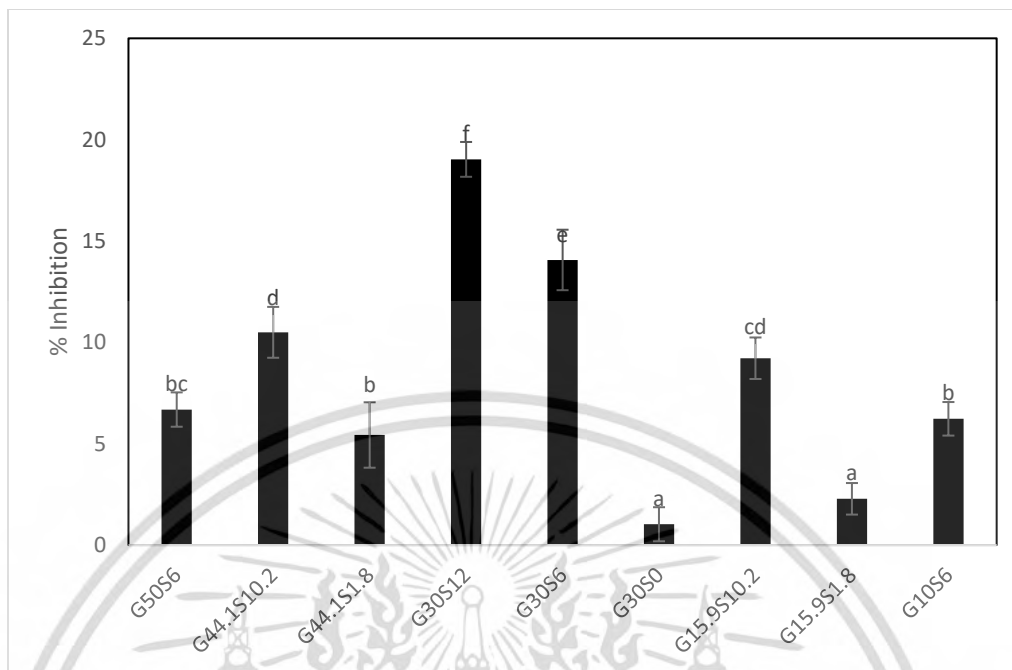
โฟเนตด้วยวิธี ABTS พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่มากที่สุดโดยมีกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่ประมาณ 30-50 % โดยน้ำหนักของ PHB และ 8-12 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากโดยการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระต้องวิเคราะห์อย่างน้อย 2 วิธี เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH และวิธี ABTS ได้ผลของการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่าง โดยวิธี DPPH เป็นอนุมูลอิสระที่ไม่มีประจุค่อนข้างเสถียร วัตถุประสงค์ของการถ่ายโอนโปรตอน (Hydrogen transfer) หรือลดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ซึ่งวิธี ABTS เป็นอนุมูลอิสระที่มีประจุบวก ทดสอบกลไกการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือโปรตอน

รูป 4.21 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของลิกโนซัลโฟเนตส่งผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของลิกโนซัลโฟเนตก็จะเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิกซึ่งสามารถต้านอนุมูลอิสระด้วยการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระมีความเสถียรมากขึ้นกลายเป็นสารที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย (Sun et al., 2024) โดยผลการทดลองของ Sun et al. (2024) พบว่าฟิล์มโคโตนซานที่เพิ่มลิกโนซัลโฟเนตลงไปส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มมากกว่า 5 เท่า เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้เติมลิกโนซัลโฟเนตลงไป การเพิ่มกลีเซอรอลไม่มีผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH แต่มีผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS (ตารางที่ 4.3) เมื่อความเข้มข้นกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้การต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มหลวมมากขึ้นโดยจะปล่อยลิกโนซัลโฟเนตออกมาจึงทำให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ Tongnuanchan et al. (2012) พบว่าฟิล์มที่มีน้ำมันหอมระเหยแตกต่างกันที่มีปริมาณกลีเซอรอล 30 % มีการต้านอนุมูลอิสระมากกว่า ฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอล 20 % แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของฟิล์มที่กลีเซอรอล 30 % หลวมขึ้นจึงสนับสนุนการปล่อยน้ำมันหอมระเหยที่มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระให้ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปฏิกิริยาของสารต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันหอมระเหยที่แตกต่างกันอาจส่งผลที่แตกต่างกัน ดังนั้นการปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระอาจแตกต่างกัน ผลการทดลองของ Cazón et al. (2024) พบว่าค่า % Inhibition ของ ABTS ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสกับโคโตนซานที่ความเข้มข้นกลีเซอรอล 0 และ 50 % อยู่ที่ 3.25 และ 3.97 % ตามลำดับ โดยการใส่กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์มีบทบาทสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระสูง เนื่องจากกลีเซอรอลช่วยในการกระจายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระจากภายในสู่ภายนอกฟิล์ม ทำให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

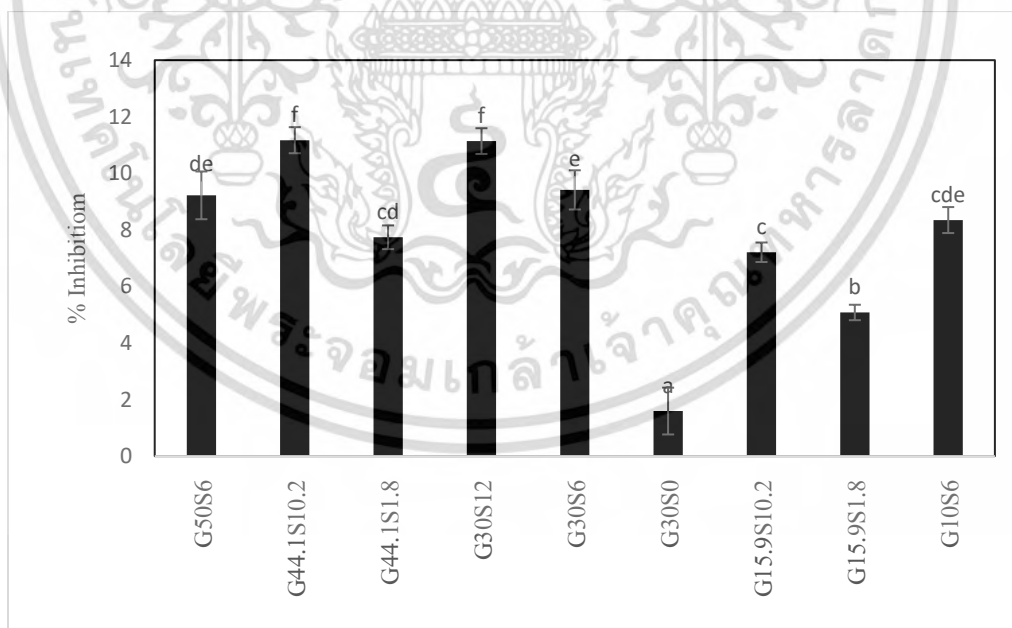
จากรูป 4.22 (ก) เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 10.0-15.9 และ 30.0-50.0 % โดยน้ำหนักของ PHB มีผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลง และที่ความเข้มข้น 15.9-30.0 % โดยน้ำหนักของ PHB มีผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตาราง

ที่ 4.3) กลีเซอ-รอลไม่ส่งผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนลิกโนซัลโฟเนตเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ยกเว้นลิกโนซัลโฟเนตความเข้มข้น 10.2 % โดยน้ำหนักของ PHB มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลง และรูปที่ 4.22 (ข) เมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 15.9-44.1 % โดยน้ำหนักของ PHB ส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นลิกโนซัลโฟเนตเพิ่มขึ้นส่งผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และจากรูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นกลีเซอรอล 15.9 และ 30.0 % โดยน้ำหนักของ PHB มีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นขนาน และเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4.3) ซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ



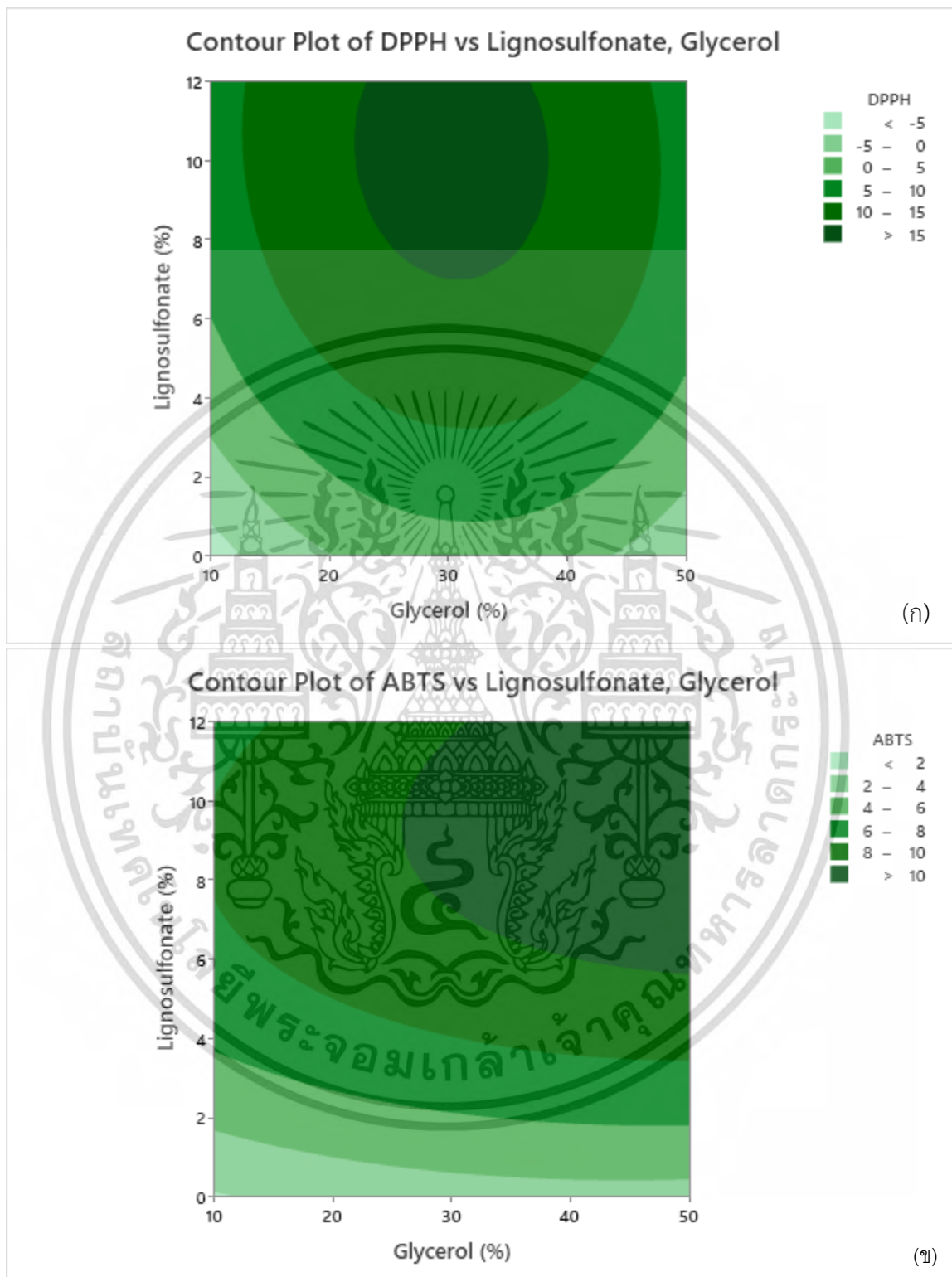


รูปที่ 4.19 ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 ด้วยวิธี DPPH  
\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซัลโฟเนต (%)



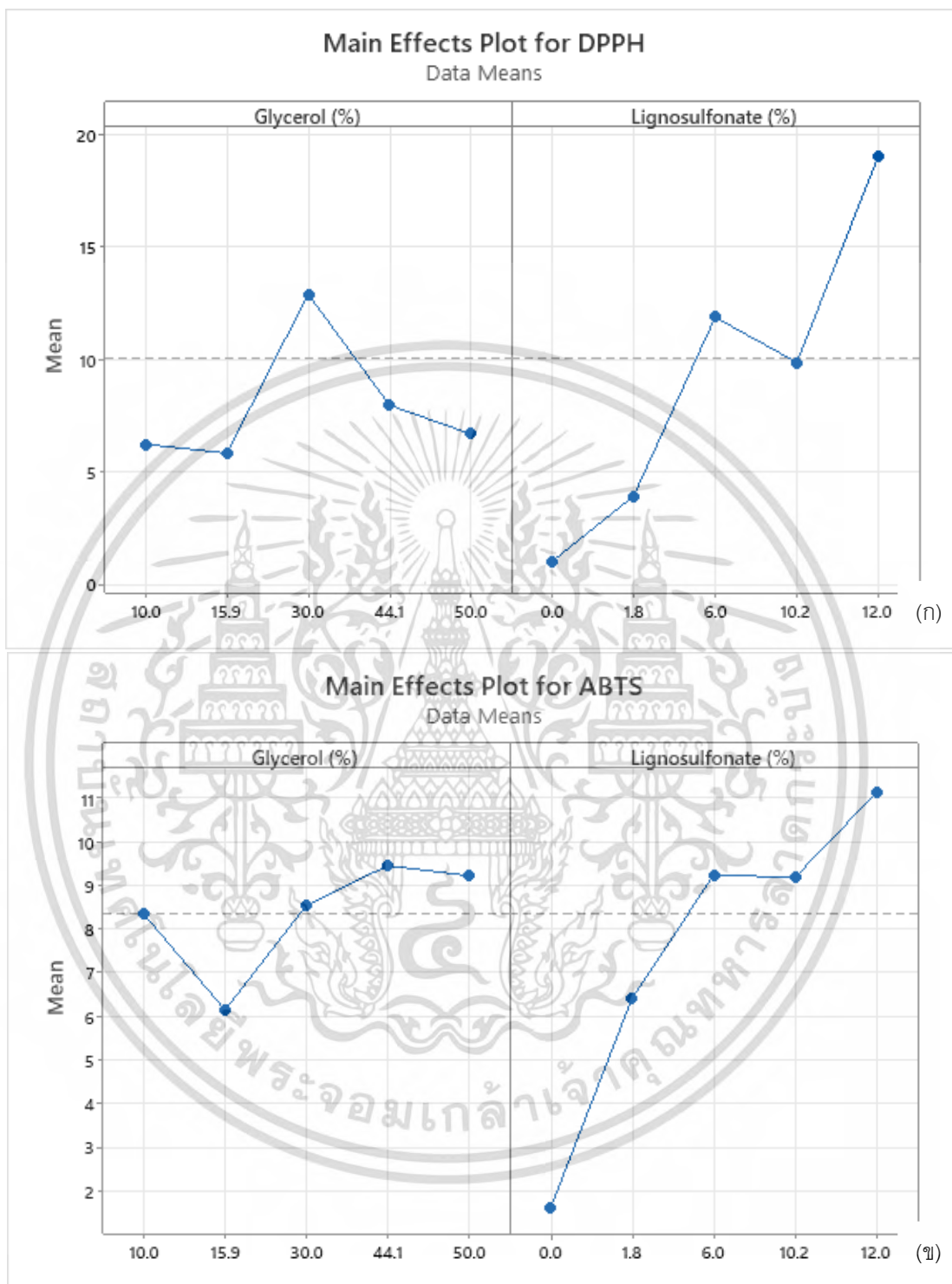
รูปที่ 4.20 ค่าการต้านอนุมูลอิสระของ G50S6, G44.1S10.2, G44.1S1.8, G30S12, G30S6, G30S0, G15.9S10.2, G15.9S1.8 และ G10S6 ด้วยวิธี ABTS  
\*G คือ ปริมาณกลีเซอรอล (%) และ S คือ ปริมาณลิกโนซัลโฟเนต (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



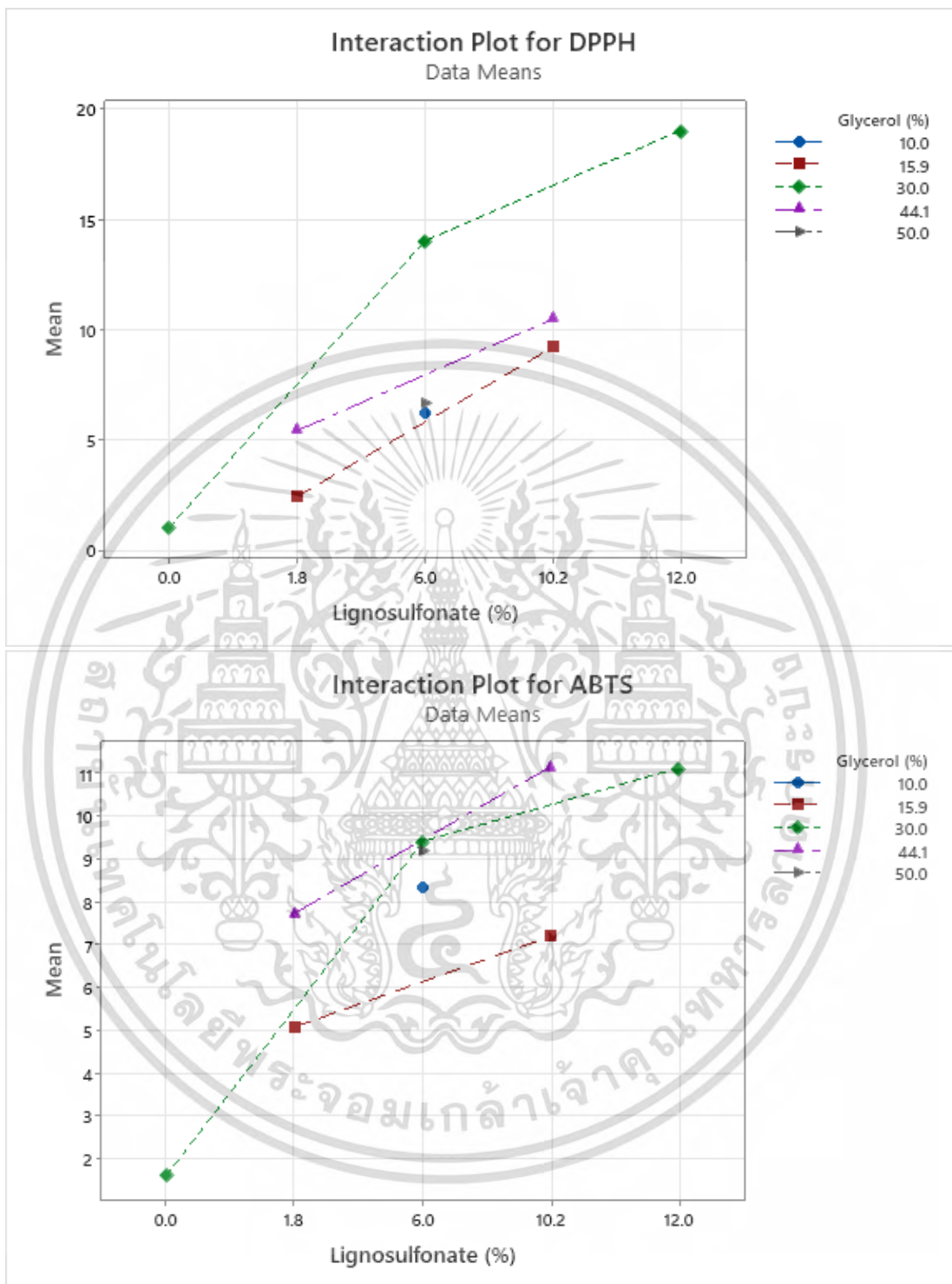
รูปที่ 4.21 คอนทัวร์พลอตที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มกับกลีเซอรอล และลิกโนซัลโฟเนต (ก) วิธี DPPH และ (ข) วิธี ABTS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การศึกษาอิทธิพลหลักของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี (ก) DPPH และ (ข) ABTS ของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 23 การศึกษาอิทธิพลร่วมของปริมาณกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี (ก) DPPH และ (ข) ABTS ของแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

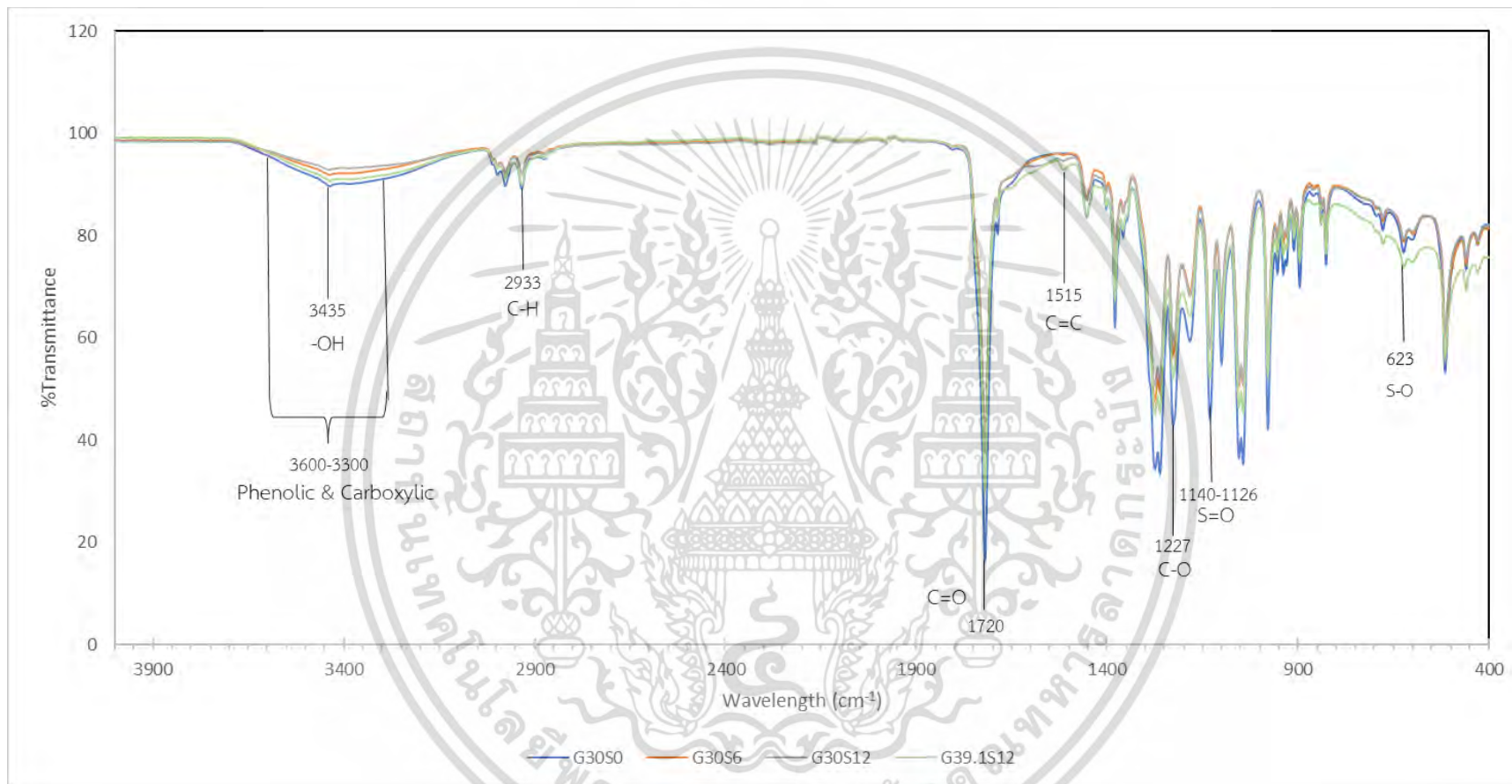
**ตารางที่ 4.3** อิทธิพลของกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตต่อสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

ปัจจัย	P value		
	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ	
		วิธี DPPH	วิธี ABTS
กลีเซอรอล	0.26	0.12	0.00*
ลิกโนซัลโฟเนต	0.00*	0.00*	0.00*
กลีเซอรอล*ลิกโนซัลโฟเนต	0.00*	0.43	0.35

\*แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $p < 0.05$ )

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากรูปที่ 4.24 เป็นสเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตที่มีองค์ประกอบต่างกัน พบว่าแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เป็นลักษณะของลิกโนซัลโฟเนตสามารถระบุได้ในสเปกตรัมของฟิล์ม PHB โดยจุดที่  $1515 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับ C=C aromatic skeletal vibration และที่จุดที่  $1140\text{--}1126 \text{ cm}^{-1}$  มาจาก S=O (sulfonates stretch vibration) โดยบริเวณผลึกสามารถระบุได้ความยาวคลื่นที่  $1720$  และ  $1227 \text{ cm}^{-1}$  เป็นผลมาจาก symmetric C=O ของลิกโนซัลโฟเนต (Dumitriu et al., 2017) และ C–O stretching vibrations ของ aliphatic esters โดยสเปกตรัมพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตแสดงการยืดออกของ C-H ที่จุดประมาณ  $3000 \text{ cm}^{-1}$  และพีคจุดที่  $1720 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบผลึกของพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (Mousavioun et al., 2012) และที่จุด  $3600\text{--}3300 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับกลุ่มไฮดรอกซิลในฟีนอลิกและคาร์บอกซิลิก โดยแถบที่  $660\text{--}620 \text{ cm}^{-1}$  เป็นแถบที่แสดงถึงหมู่ซัลโฟนิค (S–O stretching vibration) (Rodríguez-Lucena et al., 2009) พีคที่  $2933 \text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการยืดของ C–H ใน aliphatic และกลุ่ม methoxy



รูปที่ 4.24 FTIR spectra ของฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิโนลิลโฟสเฟต

#### 4.5 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตด้วยการเติมกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต

การผลิตฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดถูกวิเคราะห์ด้วย optimizing regression ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โปรแกรม Minitab statistical software ที่มี 2 ปัจจัย ได้แก่ กลีเซอรอล และ ลิกโนซัลโฟเนต โดยผลของการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ปริมาณกลีเซอรอล และ ลิกโนซัลโฟเนตที่ 39.1 และ 12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB ตามลำดับ จากตารางที่ 4.4 มีค่าการทำนายคือ ความทนทานต่อแรงดึง 10.84 MPa, ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH 14.35 % และวิธี ABTS 10.72 % และ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin Ciocalteu 33.89 %  $\mu\text{g Trolox/mL}$  จากนั้นทำการทดลองผลิตฟิล์มในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจสอบเปรียบเทียบกับค่าทำนายแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองคือ ความทนทานต่อแรงดึง 9.59 MPa, ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH 16.53 % และวิธี ABTS 11.30 % และ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 33.89 %  $\mu\text{g Trolox/mL}$  โดยมีค่าเบี่ยงเบนประมาณ 12.96, 13.20, 5.12 และ 2.03 % ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอล และลิกโนซัลโฟเนต

สภาวะ	กลีเซอรอล (%)	ลิกโนซัลโฟเนต (%)	ความทนทานต่อแรงดึง (MPa)			DPPH (% inhibition)			ABTS (% inhibition)			Folin Ciocalteu (µg Trolox/mL)		
			ทำนาย	ทดลอง	คลาดเคลื่อน (%)	ทำนาย	ทดลอง	คลาดเคลื่อน (%)	ทำนาย	ทดลอง	คลาดเคลื่อน (%)	ทำนาย	ทดลอง	คลาดเคลื่อน (%)
Optimal	39.1	12	10.84	9.59	-12.9	14.35	16.53	+13.20	10.72	11.30	+5.12	33.89	33.21	-2.03

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ไฮดรอกซีบิวทีเรตโดยใช้ลิกโนซัลโฟเนตที่มีความเข้มข้น 0.0, 1.8, 6.0, 10.2 และ 12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB และกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 10.0, 15.9, 30.0, 44.1 และ 50.0 % โดยน้ำหนักของ PHB โดยกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS เพิ่มขึ้น แต่ความทนต่อแรงดึงลดลง และความเข้มข้นของลิกโนซัลโฟเนตที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อการเพิ่มการต่อต้านจุลินทรีย์ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และเพิ่มฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระได้ทั้งวิธี DPPH และ ABTS แต่ลดปริมาณการซึมผ่านของไอน้ำและการดูดซึมน้ำ ดังนั้นจึงเป็นการบ่งชี้ว่าการเติมลิกโนซัลโฟเนตสามารถเพิ่มคุณสมบัติของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติส่งเสริมให้คุณภาพของบรรจุภัณฑ์อาหารสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร อีกทั้งยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้มากขึ้น จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตร่วมกับกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนตด้วยโปรแกรม Minitab statistical software พบว่าฟิล์มพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโดยมีปริมาณความเข้มข้นกลีเซอรอลและลิกโนซัลโฟเนต 39.1 และ 12.0 % โดยน้ำหนักของ PHB เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดมีคุณสมบัติดังนี้ ค่าความทนทานต่อแรงดึง 9.59 MPa, ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH 16.53 % และวิธี ABTS 11.30 % และ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 33.21 %  $\mu\text{g Trolox/mL}$  งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าลิกโนซัลโฟเนตสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตฟิล์มได้ ซึ่งจะเพิ่มมูลค่าให้กับลิกนินในอุตสาหกรรมของเศษไม้และกระดาษได้ อีกทั้งฟิล์มที่ได้ยังสามารถในการย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

## บรรณานุกรม

- Adjouman, Y.D., Nindjin, C., Tetchi, F.A., Dalcq, A.C., Amani, N.G., Sindic, M. 2017. “Water Vapor Permeability of Edible Films Based on Improved Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Native Starches”. *Journal of Food Processing and Technology*. 8, 665.
- Aro, T., Fatehi, P. 2017. “Production and application of lignosulfonates and sulfonated lignin”. *ChemSusChem*. 10(9), 1861-1877.
- Balk, M., Sofia, P., Tirelli, N. 2023. “Lignin, the Lignification Process, and Advanced, Lignin-Based Materials. *International of Molecular Sciences*”. 24, 11668.
- Basiak, E., Lenart, A., Debeaufort, F. 2018. “How Glycerol and Water Contents Affect the Structural and Functional Properties of Starch-Based Edible Films”. *Polymer*, 10, 412.
- Cazón, P., Puertas, G., Vázquez, M. 2024. “Characterization of multilayer bacterial cellulose-chitosan films loaded with grape bagasse antioxidant extract: Insights into spectral and water properties, microstructure, and antioxidant activity”. *International Journal of Biological Macromolecules*. 268, 131774.
- Daris, B., Knez, Z. 2020. “Poly(3-hydroxybutyrate): Promising biomaterial for bone tissue engineering”. *Acta Pharm*. 70, 1–15.
- Dumitriu, R.P., Stoica, I., Vasilescu, D.S., Cazacu, G., Vasile, C. 2017. “Alginate/ Lignosulfonate Blends with Photoprotective and Antioxidant Properties for Active Packaging Applications”. *Journal Polymer Environment*. 26: 1100-1112.
- Duval, A., Molina-Boisseau, S., Chirat, C. 2013. “Comparison of Kraft lignin and lignosulfonates addition to wheat gluten-based materials: Mechanical and thermal properties”. *Industrial Crops and Products*. 49, 66–74.
- Eslami, Z., Elkoun, S., Robert, M., Adjallé. 2023. “A Review of the Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films”. *Molecules*. 28, 6637.

- Flatt, R., Schober, I. 2012. "Superplasticizers and the rheology of concrete". Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 144-208.
- Garcia-Garcia, D., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., Torres-Giner, S., Arrieta, M.P. 2022. "Innovative solutions and challenges to increase the use of poly (3-hydroxybutyrate) in food packaging and disposables". European Polymer Journal. 178, 111505.
- Godwin, A.D. 2000. "Plasticizers". Applied polymer science: 21<sup>st</sup> century. 157-175.
- Hossain, L., Lim, L.Y., Hammer, K., Hettiarachchi, D., Locher, C. 2022. "A Review of Commonly Used Methodologies for Assessing the Antibacterial Activity of Honey and Honey Products". Antibiotics. 11, 975.
- Huang, J., Zhang, L., Chen, F. 2003. "Effects of Lignin as a Filler on Properties of Soy Protein Plastics. I. Lignosulfonate. Journal of Applied Polymer Science". 88(14): 3284-3290.
- Ikeda, Y., Phakkeeree, T., Junkong, P., Yokohama, H., Phinyocheep, P., Kitano, R., Kato, A. 2017. "Reinforcing biofiller "Lignin" for high performance green natural rubber nanocomposites". Royal society of chemistry. 7, 5222-5231.
- Kaur, R., Uppal, S.K., Sharma, P. 2017. "Antioxidant and Antibacterial Activities of Sugarcane Bagasse Lignin and Chemically Modified Lignins". Sugar Tech. 19(6):675-680.
- Khodaei, D., Oltrogge, K. and Esfahani, Z. Hamidi. 2020. "Preparation and characterization of blended edible films manufactured using gelatin, tragacanth gum and, Persian gum". LWT. 117, 2.
- Koller, M. 2018. "A Review on Established and Emerging Fermentation Schemes for Microbial Production of Polyhydroxyalkanoate (PHA) Biopolyesters". Fermentation. 4, 30.
- Kumar, V., Vinayak, A.K., Vankatachalam, S., Muruganandam, L. 2022. "Moisture barrier behavior of polymer films on food packaging plastic materials". International Journal for Technological Research in Engineering. 9(5).
- Lebo, S.E., Gargulak, J.D., McNally, T.J. 2001. "Lignin". Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 1-26.

- Lenihan, P., Orozco, A., O'neill, E., Ahmad, M., Rooney, D., Walker, G. 2010. "Dilute acid hydrolysis of lignocellulosic biomass". *Chemistry Engineer Journal*. 156(2):395-403.
- Li, J., Li, H., Yuan, Z., Fang, J., Chang, L., Zhang, H., Li, C. 2019. "Role of sulfonation in lignin-based material for adsorption removal of cationic dyes". *International Journal of Biological Macromolecules*. 135, 1171–1181.
- Lin, N., Fan, D., Chang, P.R., Yu, J., Cheng, X., Huang, J. "Structure and Properties of Poly (butylene succinate) Filled with Lignin: A Case of Lignosulfonate. *Journal of Applied Polymer Science*". 121, 1717–1724.
- Mangaraj, S., Yadav, A., Bal, L.M., Dash, S.K., Mahanti, N.K. 2017. "Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review". *Journal of Packaging Technology and Research*. 3, 77–96.
- Market and Market. 2023. "Bioplastics & Biopolymers Market by Type (NonBiodegradable/Bio-Based, Biodegradable), End-Use Industry (Packaging, Consumer Goods, Automotive & Transportation, Textiles, Agriculture & Horticulture), Region - Global Forecast to 2027". Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biopolymers-bioplastics-market-88795240.html>. Access on 1 June 2023.
- McAdam, B., Fournet, M.B., McDonald, P., Mojicevic, M. 2020. "Production of Polyhydroxybutyrate (PHB) and Factors Impacting Its Chemical and Mechanical Characteristics". *Polymers*. 12, 2908.
- Mousavioun, P., George, G.A., Doherty, W.O.S. "Environmental degradation of lignin/poly (hydroxybutyrate) blends". *Polymer Degradation and Stability*. 97, 1114-1122.
- Nayak, K., Gupta, P. 2012. "Protein based biodegradable polymer for food and non-food packaging: a review". In: Conference: third international conference on natural polymers, biopolymers, biomaterials, their composites, blends, IPNs, polyelectrolytes and gels: macro to nano scales (ICNP-2012).

- Nobre, P.C., Borges, E.L., Silva, C.M., Casaril, A.M., Martinez, D.M., Lenardão, E.J., Alves, D. Savegnago, L., Perin, G. 2014. “ Organochalcogen compounds from glycerol: Synthesis of new antioxidants”. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*. 22, 6242–6249.
- Núñez-Flores, R., Giménez, B., Fernández-Martín, F., López-Caballero, M.E., Montero, M.P. 2013. “ Physical and functional characterization of active fish gelatin films incorporated with lignin”. *Food Hydrocolloids*. 30, 163-172.
- Qin, Y., Mo, W., Yu, L., Yang, D., Qiu, X. 2016. “ A light-colored hydroxypropyl sulfonated alkali lignin for utilization as a dye dispersant”. *Journal Holzforschung*.
- Rachtanapun, P., Tongdeesoontorn, W. 2009. “Effect of glycerol concentration on sorption isotherms and water vapour permeability of carboxymethyl cellulose films from waste of mulberry paper”. *Asian Journal of food and Agro-Industry*. 2(04), 478-488.
- Rambabu, K., Bharath, G., Banat, F., Show, P.L., Cocolletzi, H.H. 2018. “ Mango leaf extract incorporated chitosan antioxidant film for active food packaging”. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Rodríguez-Lucena, P., Lucena, J.J., Hernández-Apaolaza, L. 2009. “Relationship between the structure of Fe-Lignosulfonate complexes determined by FTIR spectroscopy and their reduction by the leaf Fe reductase”. *The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI*.
- Ruiz, E., Cara, C., Manzanares, P., Ballesteros, M., Castro, E. 2008. “ Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks”. *Enzyme and Microbial Technology*. 42(2), 160-166.
- Ruwoldt, J., Opedal, M. 2022. “ Green materials from added-lignin thermoformed pulps. *Industrial Crops and Products*”. 185, 115102.
- Sartori, T., Menegalli, F.C. 2016. “ Development and characterization of unripe banana starch films incorporated with solid lipid microparticles containing ascorbic acid”. *Food Hydrocolloids*. 55, 210-219.

- Shankar, S., Reddy, J.P., Rhim, J.-W. 2015. “Effect of lignin on water vapor barrier, mechanical, and structural properties of agar/lignin composite films”. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Siripatrawan, U., Harte, B. 2010. “Physical properties and antioxidant activity of an active film from chitosan incorporated with green tea extract. *Food Hydrocolloids*” . 24, 770-775.
- Solihat, N.N., Sari, F.P., Falah, F., Ismayati, M., Lubis, M.A.R., Fatriasari, W., Santoso, E.B., Syafii, W. 2021. “Lignin as an Active Biomaterial: A Review” . *Jurnal Sylva Lestari*. 9(1), 1-22.
- Sun, M., Liu, N., Ni, S., Xu, Q., Gao, H., Dai, H., Fu, Y., Qin, M. 2024. “Enhanced strength, antioxidant and barrier properties of chitosan-based film by bentonite and lignosulfonate”. *Food Packaging and Shelf Life*. 42, 101246.
- Tawaf, A.S., Li, Z., Li, Z., Zhang, A. 2022. “Composition and Role of Lignin in Biochemicals”. *Intechopen*.
- Thungphotrakul, N., Dittanet, P., Loykulnunt, S., Tanpichai, S., Parpainainar, P. 2019. “Synthesis of sodium lignosulfonate from lignin extracted from oil palm empty fruit bunches by acid/ alkaline treatment for reinforcement in natural rubber composites”. *The International Conference on Materials Research and Innovation. Series: Materials Science and Engineering* 526.
- Tongnuanchan, P., Benjakul, S., Prodpran, T. 2012. “Properties and antioxidant activity of fish skin gelatin film incorporated with citrus essential oils” . *Food Chemistry*. 134, 1571–1579.
- Vieira, M.G.A., Da Silva, M.A., Dos Santos, L.O., Beppu, M.M. 2011. “Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review”. *European Polymer Journal*. 47, 254–263.
- Vroman, I., Tinghert, L. 2009. “Biodegradable Polymers”. *Materials*. 2, 307-344.

- Wang, H., Yuan, T., Song, G., Sun, R. 2021. “Advanced and Versatile Lignin-Derived Biodegradable Composite Film Materials Toward a Sustainable World”. *Green Chemistry*. 1-27.
- Yan, Z., Li, J., Chang, S., Cui, T., Jiang, Y., Yu, M., Zhang, L., Zhao, G., Qi, P., Li, S. 2015. “Lignin relocation contributed to the alkaline pretreatment efficiency of sweet sorghum bagasse”. *Fuel*. 158:152-158.
- Zadeh, E.M., O’Keefe, S.F., Kim, Y.-T. 2018. “Utilization of Lignin in Biopolymeric Packaging Films”. *American Chemical Society Omega*. 3, 7388-7398.
- Zakaria, N.H., Muhammad, N., Abdullah, M.M.A.B. 2018. “Effect of Glycerol Content on Mechanical, Microstructure and Physical Properties of Thermoplastic Potato Starch”. *AIP Conference Proceedings* 2030.
- Zhou, H., Chang, Y., Wu, X., Yang, D., Qiu, X. 2015. “Horseradish peroxidase modification of sulfomethylated wheat straw alkali lignin to improve its dispersion performance”. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 3, 518-523.
- Zhu, J., Fang, Y., Wakisaka, M., Hafid, H.S., Yang, Z., Yin, Y., Omura, T., Fang, W. 2024. “Fabrication of flexible chitosan film reinforced with pulping by-product lignosulfonates for cherry-tomato preservation”. *Food Chemistry: X*. 21: 101181.



ภาคผนวก ก  
วิธีการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการวิเคราะห์

### 1. การวิเคราะห์ความหนา

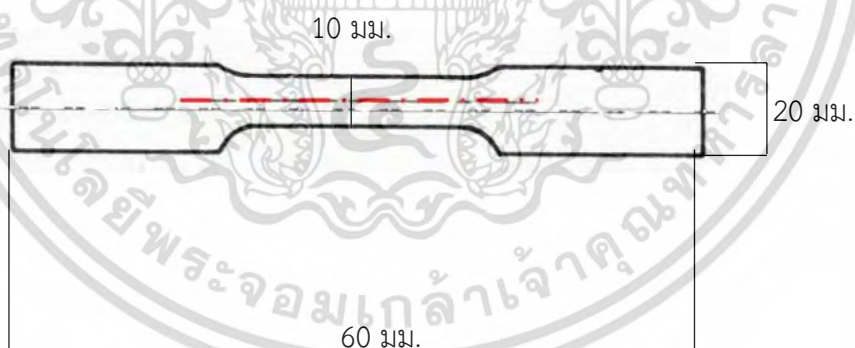
นำแผ่นฟิล์มมาพับให้ได้ 4 ทบ เนื่องจากฟิล์มมีความบาง จากนั้นทำการวัดด้วยเครื่องมือไมโครมิเตอร์โดยทำการสุ่มวัด 5 จุด (รูปที่ ก.1) แล้วคำนวณค่าเฉลี่ยแล้วหาร 4



รูปที่ ก.1 การวัดความหนา

### 2. การวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง

วิธีการเตรียมฟิล์มใช้สำหรับการวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง ตัดฟิล์มขนาด 20×60 มิลลิเมตร โดยทำการตัดบริเวณที่ต้องการวัดให้ได้ความกว้าง 10 มิลลิเมตร (ตามรูปที่ ก.2) โดยบันทึกผลการทดสอบเป็นค่าแรงดึงที่สูงที่สุด



รูปที่ ก.2 การเตรียมตัวอย่างฟิล์มสำหรับการวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง

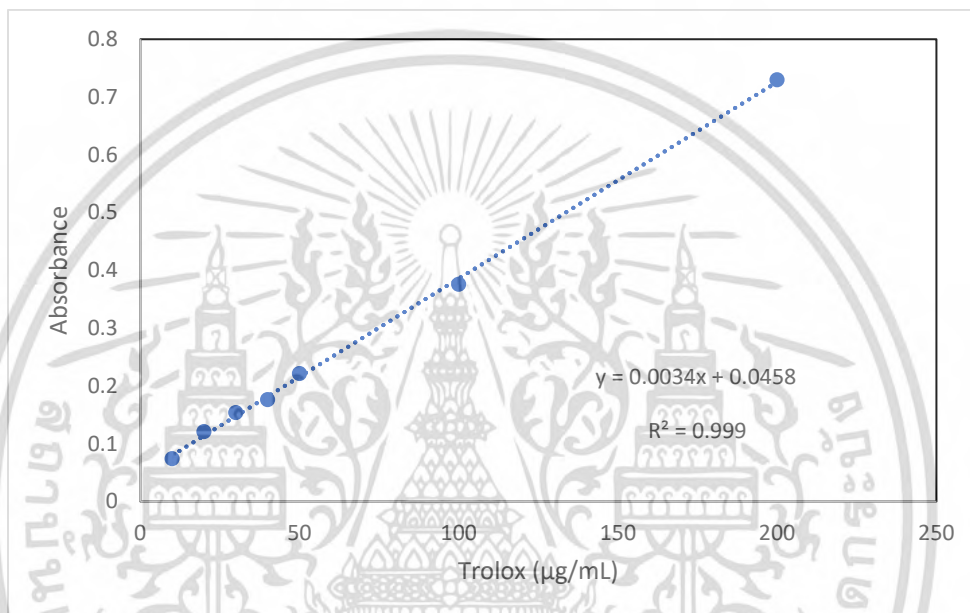
### 3. การเตรียมสารละลายในการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

3.1 สาร Folin Ciocalteu reagent ที่ความเข้มข้น 10 % โดยปริมาตร : ผสม Folin Ciocalteu reagent 1 มิลลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 9 มิลลิตร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารละลาย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เข้มข้น 7.5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร : นำ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.75 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร

3.3 สารละลายมาตรฐาน Trolox : ผสม Trolox 0.01 กรัม ในเอทานอลจนได้ความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งด้วยเอทานอลจนได้ความเข้มข้นเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 100 และ 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

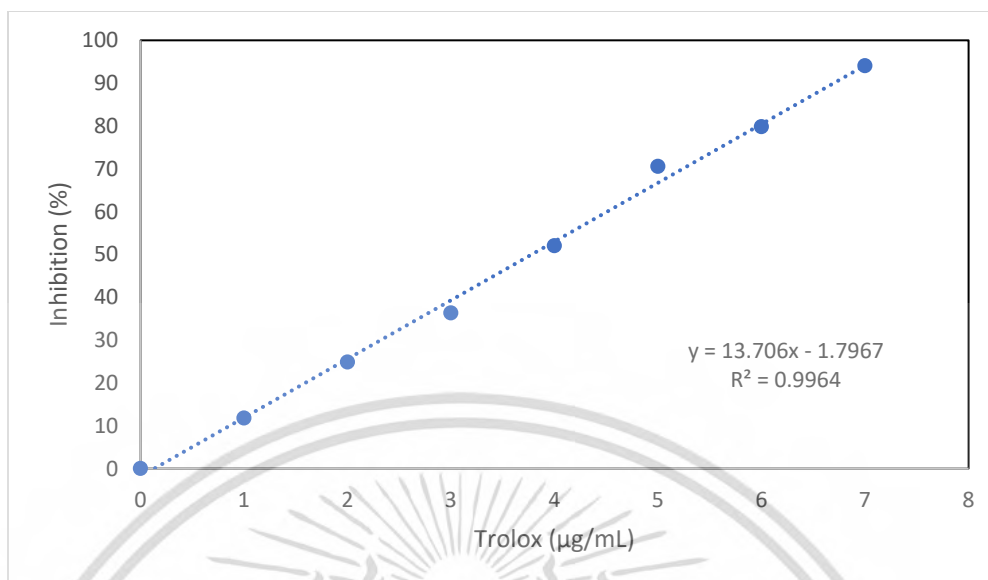


รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ Trolox ด้วยวิธี Folin Ciocalteu

4. การเตรียมสารละลายในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

4.1 สารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.1 mM ซึ่งสาร DPPH 0.0039 กรัม นำมาละลายด้วยเอทานอลบริสุทธิ์แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

4.2 สารละลายมาตรฐาน Trolox : ผสม Trolox 0.01 กรัม ในเอทานอลจนได้ความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งด้วยเอทานอลจนได้ความเข้มข้นเป็น 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของ Trolox

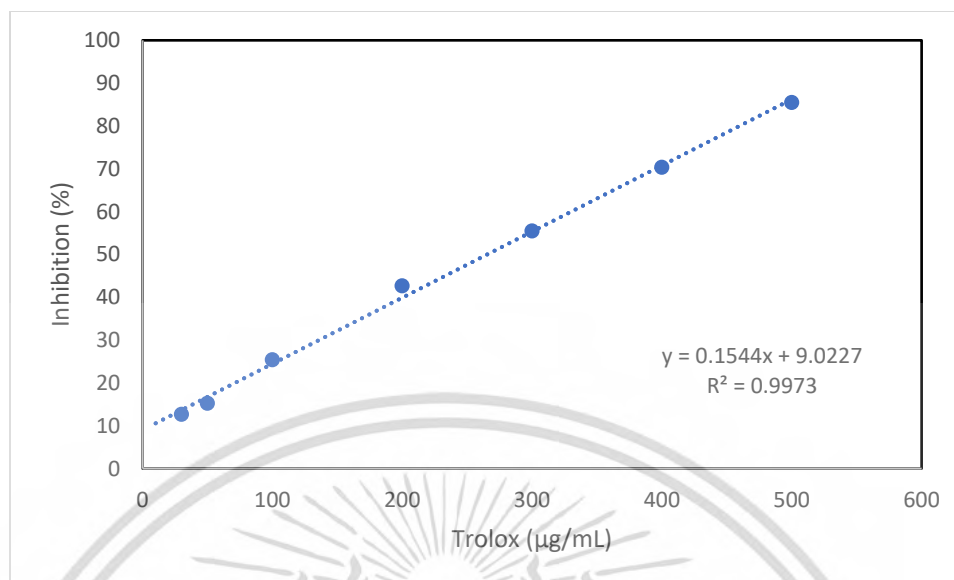
#### 5. การเตรียมสารละลายในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS

5.1 สารละลาย ABTS ความเข้มข้น 7 mM ชั่งสาร ABTS 0.0360 กรัม นำมาละลายด้วยเอทานอลบริสุทธิ์แล้วปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร

5.2 สาร  $K_2S_2O_8$  ที่ความเข้มข้น 2.45 mM นำ  $K_2S_2O_8$  0.0066 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร

5.3 สารละลายมาตรฐาน Trolox : ผสม Trolox 0.01 กรัม ในเอทานอลจนได้ความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางอีกครั้งด้วยเอทานอลจนได้ความเข้มข้นเป็น 30, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

5.4 นำสารละลาย ABTS และ  $K_2S_2O_8$  มาผสมกันด้วยสัดส่วน 1:1 แล้วเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ ก.5 กราฟมาตรฐานฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ATBS ของ Trolox

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพฤษส์สุดา สกุลแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	22 มกราคม 2540 ที่ระนอง
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 30/5 หมู่ – ตำบล พลับพลา อำเภอ วังทองหลาง จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10310
ประวัติการศึกษา:	
2561	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:	
ปริญญาโท	Non-destructive qualities determination of lychee by Hyperspectral imaging technique.
การประชุมวิชาการ	การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับนานาชาติ ครั้งที่ 16 ณ Oakwood hotel & residence Sri Racha, Chonburi, Thailand, 26-27 July 2023. งานวิจัยเรื่อง Development of Biodegradable Film Using Polyhydroxy Butyrate in Combination with Glycerol and Lignosulfonate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้